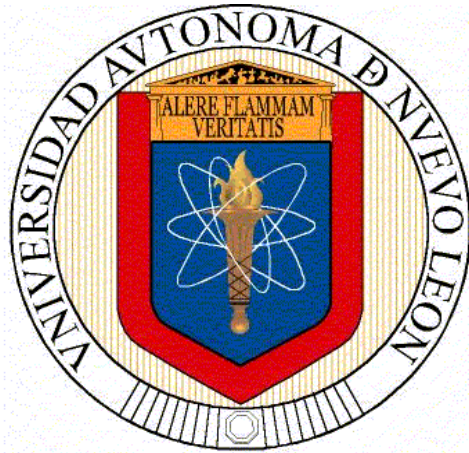


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA
EVALUAR LA EFECTIVIDAD DEL PROCESO DE LAVADO DE
MUESTRAS TEXTILES”**

PRESENTA:

RICARDO DELGADO BANDA

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE
LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍA
TÉRMICA Y RENOVABLE**

MAYO 2015

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica



“Diseño y construcción de un dispositivo para evaluar la efectividad
del proceso de lavado de muestras textiles”

Por: Ing. Ricardo Delgado Banda

En opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con
Orientación en Energía Térmica y Renovable

Asesor de tesis: M.C. Miguel García Yera
Co-Asesor: Dr. Santos Méndez Díaz

Mayo 2015

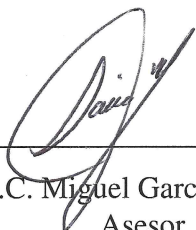
Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

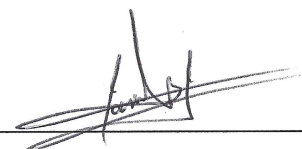
Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis **“Diseño y construcción de un dispositivo para evaluar la efectividad del proceso de lavado de muestras textiles”** realizada por el alumno Ricardo Delgado Banda con número de matrícula 0757086, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovables.

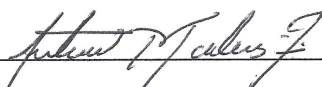
El Comité de Tesis



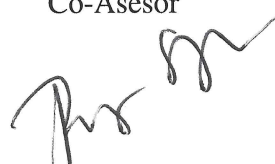
M.C. Miguel García Yera
Asesor



Dr. Santos Méndez Díaz
Co-Asesor



Dr. Arturo Morales Fuentes
Revisor



Dr. Rodrigo Salgado Ayala
Revisor



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirección de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. a 28 de Mayo de 2015.

*Con todo mi Amor y Cariño para,
Mi esposa Rosa Elia González...
e hija Ana Michelle Delgado...*

Agradecimientos

A Dios por la fortaleza que me otorgó para poder concluir este trabajo.

A mi Esposa por ser mi inspiración.

A mis Padres por su apoyo incondicional.

Al M.C. Miguel García Yera, director de tesis, por su labor de tutor durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Santos Méndez Díaz, Co-director de tesis, por su labor durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz, por su labor en la realización de este trabajo.

Al M.C. Hugo Ramírez Hernández, por su labor en la realización de este trabajo.

A los profesores Dr. Simón Martínez Martínez, Dr. Arturo Morales Fuentes, Dra. Elvira Martínez García, Dr. Max Salvador Hernández, Dr. Oscar De La Garza, por sus enseñanzas en las aulas de clase.

A los compañeros de la maestría, Rene Gerardo Mondragón González, Carlos Rafael Uder Contreras, Rosario Rodríguez Altaif, Carlos Humberto Sánchez, Adrián Martín Cobos, Andrés Patiño, Yonathan Loredó, Mario Chapa, Cesar Ramírez, Adolfo Benitez, Victor Madrid, Luis Valdez.

A CONACYT por el apoyo como becario de pos-grado bajo la beca número 302798.

Índice general

Resumen	1
Abstract	2
1. Introducción	3
1.1. Antecedentes	3
1.1.1. Motivación	3
1.1.2. Justificación	3
1.1.3. Estado del arte	4
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos específicos	7
1.3. Hipótesis	7
2. El proceso de lavado de textiles	8
2.1. El aflojamiento de la suciedad	8
2.1.1. Detergencia	8
2.1.2. Remoción de suciedad orgánica líquida	11
2.1.3. Remoción de suciedad sólida (Partículas)	16
2.2. Transferencia de la suciedad	17
2.2.1. Flujo a través de las estructuras textiles	17
2.2.2. Transferencia de masa	21
2.3. Diseño del dispositivo de lavado	23
2.3.1. Construcción del dispositivo de lavado	27
2.3.2. Sistema de control	29
2.3.3. Pruebas de repetibilidad del dispositivo de lavado	30

3. Dispositivo para evaluar el grado de limpieza en una muestra textil	33
3.1. Diseño y construcción de un dispositivo para evaluar el grado de limpieza mediante técnicas ópticas	33
3.2. Calibración del sistema de adquisición de imágenes	39
4. Análisis de imágenes	43
4.1. La visión	43
4.1.1. Sistema visual humano:	44
4.1.2. Modelo de visión por computadora	44
4.1.3. Definición de imagen digital	45
4.2. Digitalización de imágenes	45
4.3. Adquisición de imagen	46
4.4. Muestreo y cuantificación:	46
4.5. Procesamiento de histograma:	47
4.6. Definición de histograma:	47
5. Evaluación de los beneficios en términos de los ahorros de energía y agua	58
5.1. Diseño de experimentos	58
5.2. Pruebas físicas de lavado de muestras textiles	59
5.3. Cálculo de la energía	61
6. Análisis de resultados	64
7. Conclusiones	74
7.1. Conclusiones técnicas del estudio de remoción de suciedad.	74
8. Componentes del Sistema de Lavado	78
Bibliografía	89
Lista de símbolos	92
Índice de figuras	93
Índice de tablas	98

Resumen

En el presente trabajo se demuestra la caracterización de la efectividad de dos detergentes desarrollados para remover suciedad orgánica, inorgánica y mezcla de ambas en materiales textiles. Se diseñó y construyó un dispositivo experimental para el lavado de muestras textiles que permite el uso de técnicas de análisis de imagen para evaluar el grado de limpieza de las muestras. Se establecieron diferentes ciclos de lavado bajo condiciones controladas de temperatura, velocidad de flujo y tiempo, además se trabajó en el desarrollo de un diseño de experimentos que permitió evaluar la relevancia de las características que hacen distintos a los ciclos de lavado. Se estimó el ahorro que se puede lograr en el consumo de energía en ciclos de lavado de lavadoras comerciales como consecuencia de la reducción del tiempo del ciclo de lavado, el ahorro de energía debido al uso de agua fría, así como el ahorro de agua que es posible obtener.

Abstract

This work shows the characterization of the effectiveness of two developed detergents to remove organic soil, inorganic and mixing both in textiles. An experimental device was designed and built for washing textile samples which allows the use of image analysis techniques to evaluate the degree of cleanliness of the samples. Different wash cycles under controlled conditions of temperature, flow rate and time were established, also an experimental design was developed to allow us for evaluating the relevance of the features that the different wash cycles make. Saving that can be achieved in energy consumption in commercial washing cycles as a result of reducing the time of the wash cycle was estimated, energy saving due to the use of cold water and the water savings that can be possible obtain.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. Motivación

Hoy en día el ahorro de energía es un tema importante para los gobiernos y organizaciones a nivel mundial, debido principalmente al agotamiento de las fuentes no renovables y a los altos costos económicos que representa la transformación de los recursos energéticos desde la forma en que los encontramos en la naturaleza hasta una forma utilizable. Por otro lado el ahorro del agua también se considera de gran importancia, es por eso que en los últimos años se ha hecho un importante esfuerzo por parte de investigadores de diferentes áreas para lograr hacer mas eficientes los procesos y dispositivos que no pueden prescindir del uso de agua y energía. El proceso de lavado de textiles, tema central de esta investigación, demanda altos consumos de energía y altos consumo de agua. Resulta de gran importancia mejorar las características químicas y físicas de los detergentes para que así ayuden a evitar el uso de agua caliente, así como también mejorar las metodologías de los procesos de lavado de textiles de tal forma que sean acordes a las características de los detergentes.

1.1.2. Justificación

Se tiene la necesidad de evaluar de forma objetiva los beneficios del uso de cierto detergente, desarrollado en un centro de investigación tecnológico. De manera particular, se pretende cuantificar la reducción en los consumos de energía y agua que se pueden aportar con el uso de dicho detergente en los procesos de lavado convencionales de las lavadoras domésticas. El proceso de lavado de ropa o textiles por lo general está relacionado con el

uso de sustancias químicas que favorecen que la suciedad orgánica e inorgánica se vuelva soluble y se remueva lo más rápido posible en una solución jabonosa, que posteriormente se enjuaga para retirar la solución de la ropa.

1.1.3. Estado del arte

Las técnicas y dispositivos de lavado han evolucionado desde las tinas de lavado que originalmente patentara una empresa de los Estado Unidos, hasta la gran variedad de modelos automáticos que ofertan varias marcas comerciales hoy en día. Muchas mejoras se han ido implementado paulatinamente, como la propuesta de Castricone [1], quién diseñó una máquina de lavado doméstico que incorporó un nuevo principio de agitación a través de orificios. Kirby [2] presentó una máquina de lavado doméstico mejorada para lavar, enjuagar y secar ropa en un único contenedor, posteriormente, mejoró las características de la máquina al controlar la entrega de agua limpia en una máquina de lavado doméstica tipo centrífuga [3].

De manera paralela, los detergentes también han evolucionado como se puede ver en los registros de Krummel y Gault [4] acerca de la composición de materiales de intercambio iónico a base de aluminosilicato insoluble en el agua, mismos que son eficientes en la remoción de la dureza iónica del líquido de lavado. Goffinet [6] desarrolló un detergente líquido para uso en limpiadores de superficies duras especialmente útil en la remoción de grasas.

El desarrollo posterior de las estrategias de lavado manifiesta la necesidad de relacionar de forma muy estrecha las características del detergente y el diseño del proceso de lavado. Hoffmann y Arendt [7] presentaron un procedimiento y mecanismo de lavado en máquinas tipo tina horizontal donde en el enjuague y centrifugado la velocidad de la tina genera una aceleración entre 0.4 y 0.95 g. Fukuzawa y Shikamori [8] desarrollaron una máquina y un método de lavado en el que el líquido es expulsado y rociado directamente sobre la ropa, lo que reduce la cantidad de líquido que lava promoviendo la fricción en el lavado.

Nuevas generaciones de detergentes han emergido con el objeto de reducir el uso de agua tibia en el lavado. Mazzola [9] presentó componentes que se disocian de tal forma que se disuelven completamente en agua fría (entre 2-24 °C), y un detergente en polvo para lavandería basado en carbonato de sodio mismo que se puede usar en agua fría [10], donde se adiciona esterato de sodio de tal forma que disminuye el residuo sin disolver de

carbonato de sodio en condiciones de lavado con agua fría.

Los procesos de lavado han evolucionado procurando deteriorar lo menos posible las fibras. Takagawa [11] diseñó un proceso de lavado en seco en el que el solvente de lavado se disuelve en un líquido perfluorocarbonado, se calienta y evapora para remover dicho líquido solvente. Joo y Song [12] desarrollaron un método de lavado casero de fibras delgadas y arrugables como la seda y la lana a través de máquinas de lavado doméstico rotatorias con corrientes de agua adecuadas para evitar daños.

Los productos para lavado se han especializado para satisfacer requerimientos especiales. Shu Yamaguchi et al. [13] crearon un método de lavado con un detergente libre de fósforo y baja concentración de surfactantes. Mazzola [14] elaboró un detergente en polvo que puede ser utilizado en agua fría con un mínimo de residuo de detergente sin disolver en el agua de lavado. Por su parte, Hinton [15] presentó una formulación de detergentes que es posible usar adecuadamente en lavado de trastes de cocina y en limpieza de ropa.

Los desarrollos tecnológicos están siempre basados en estudios básicos de los fenómenos involucrados además del seguimiento y registro de la evolución de las necesidades que dan lugar a dichos desarrollos. De Boer y Larson [16] presentaron un estudio de la reducción de los costos debidos al consumo de jabones, detergentes, enjuagues y suavizantes y su relación con la dureza del agua. Bubl [17] encontró que la temperatura es más importante que el tipo de detergente en la remoción de sólidos. Purchase et al. [18] desarrollaron un análisis de las fuentes de variación del costo del lavado de ropa evaluando el promedio de éste en los Estados Unidos de América, donde el costo se incrementa en lugares en los que los detergentes a base de fosfato no están disponibles debido al uso de agua caliente y aditivos de lavado, y en regiones con agua dura debido al uso de agua caliente y el uso de suavizante.

Se han hecho esfuerzos como el de Easley et al. [19], por analizar el efecto de la temperatura sobre la remoción de suciedad en ropa, además de su relación con el detergente y los efectos de lavados múltiples. Maase y Tilburg [20] revisaron los beneficios de utilizar enzimas proteolíticas para mejorar el desempeño de detergentes con agua fría para promover el ahorro de energía y para conservar fibras sintéticas.

Existen también estudios enfocados a revisar como los efectos del lavado con detergentes puede impactar en la salud de las personas. McDonald y Tovey [21] estudiaron la relación que existe entre la temperatura de lavado de ropa y la población de ácaro de polvo y agentes alérgenos en la ropa de cama. Ellos encontraron que los ácaros son aniquilados a

temperaturas superiores a los 55 °C. A temperaturas menores la destrucción de ácaros no mejoró sustancialmente con el uso de los detergentes y productos de lavandería probados. El lavado con agua fría con detergentes no mata los ácaros pero sí reduce en más del 90 % los alérgenos de polvo. Por su parte, el lavado en seco no reduce la concentración de los alérgenos de polvo, sin embargo, sí mata a los ácaros. Berardesca et al. [22] evaluaron concentraciones de surfactantes que generan reacciones de irritación en la piel y dermatitis. Encontraron que la temperatura de lavado tiene un efecto importante sobre la aparición de dermatitis. El daño en la piel es mayor en sitios tratados con temperaturas tibias. Peterson et al. [23] estudiaron la distribución de la diarrea en una población y su relación con la disponibilidad de jabones y agentes de limpieza y Zock et al. [24] evaluaron la relación del riesgo de contraer o agravar el asma por el uso de limpiadores.

Scheibel [25] llevó a cabo una revisión interesante acerca de la evolución de la tecnología de los surfactantes (componentes que representan entre el 15 y 40 % de la formulación total de los detergentes), analizando la forma en que han cambiado para ajustarse a las demandas de conservación medio ambiental y a los hábitos de los consumidores. Más recientemente, los esfuerzos se han enfocado en integrar componentes a los detergentes para reducir los daños, como lo ha propuesto Cortez et al. [26] al presentar un tratamiento de textiles a base de enzimas proteínicas Transglutaminase para incrementar la resistencia a la tensión de las proteínas de la lana y mejorar su resistencia al deterioro causado por detergentes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estimar de forma cuantitativa los beneficios de emplear un detergente denominado como *A*, desarrollado para la remoción de suciedad orgánica, inorgánica y mezcla de éstas. Mediante la aplicación de una metodología basada en técnicas ópticas se pretende analizar de manera comparativa los resultados obtenidos con diferentes: Niveles de agitación en ciclos de lavado, distinta duración del ciclo, temperatura, dureza del agua, y grado de ensuciamiento. Se persigue cuantificar el ahorro de energía que se puede lograr en ciclos de lavadoras comerciales, ahorro de energía debido a la reducción del tiempo del ciclo de lavado y el uso de agua fría, además del ahorro de agua al utilizar el detergente *A* en

comparación con un detergente denominado como **B**.

1.2.2. Objetivos específicos

- Recopilar información técnica del proceso físico químico de ensuciamiento y lavado de textiles, además de la revisión del estado del arte del lavado industrial.
- Identificar los fenómenos fundamentales del proceso del lavado de textiles y definir los parámetros físicos relacionados con el grado de limpieza.
- Diseño y construcción de un dispositivo para lavar muestras textiles con repetibilidad.
- Diseño y construcción de un dispositivo para evaluar el grado de limpieza en una muestra textil mediante técnicas ópticas.
- Desarrollar un diseño de experimentos que permita evaluar la relevancia de las características que hacen distintos a los ciclos de lavado.
- Estimar el ahorro que se puede lograr en el consumo de energía en ciclos de lavadoras comerciales, energía debido a la reducción del tiempo del ciclo de lavado y el uso de agua fría, además del ahorro de agua al utilizar el detergente **A** versus detergente **B**.

1.3. Hipótesis

El uso de un detergente denominado **A** combinado con el uso de agua fría y la reducción del tiempo en los ciclos de lavado, promueve el ahorro de energía en comparación con el uso de otro detergente denominado **B** bajo las mismas condiciones controladas de lavado y establecidas en el diseño de experimentos como las óptimas para la remoción de la suciedad de la manera más eficiente.

Capítulo 2

El proceso de lavado de textiles

La limpieza obtenida en el proceso de lavado es el resultado de una sinergia entre: la energía mecánica, la energía química, la energía térmica y el tiempo. Estos factores tienen que desempeñar un proceso de separación simple en el cual la suciedad es removida desde un sustrato de textil. En este proceso, dos importantes etapas pueden ser destacadas: el aflojamiento de la suciedad y la transferencia de la suciedad. En el aflojamiento de la suciedad las fuerzas físicas de unión entre la suciedad y el sustrato son rotas. En la transferencia de la suciedad del sustrato, la suciedad aflojada es transportada desde el sustrato hacia el solvente o líquido de lavado. Resultados recientes en esta área están bajo la influencia de la dinámica de la tensión superficial y de los efectos de surfactantes dentro del fenómeno del flujo capilar en el lavado de textiles.

En ambas etapas, el aflojamiento de suciedad y la transferencia de suciedad, una cantidad de flujo del líquido es indispensable para liberar la energía cinética requerida. La energía mecánica generada por la rotación de un tambor en una lavadora, esta dirigida a entregar la energía cinética para los procesos de aflojamiento de suciedad y la transferencia de suciedad.

2.1. El aflojamiento de la suciedad

2.1.1. Detergencia

En términos generales un detergente es un producto que posee un poder limpiador de superficie. Los detergentes, tanto en polvo como líquidos, de uso doméstico o industrial, son formulaciones complejas en las cuales un surfactante (o una mezcla de surfactantes) juega un papel determinante en la combinación de efectos que se desean: mojabilidad,

descenso de la tensión interfacial, adsorción en las interfases líquido-líquido y sólido-líquido, solubilización y emulsificación.

La detergencia se refiere al proceso de limpieza de una superficie sólida o de una estructura fibrosa mediante un baño líquido, en el cual la acción limpiadora del solvente está considerablemente aumentada por procesos físico-químicos atribuible al surfactante y demás componentes del detergente. Se denomina generalmente suciedad a los materiales indeseables que llegan a acumularse en la superficie de un sólido o en la trama fibrosa de un textil. Existen esencialmente dos tipos de suciedad. La primera es de carácter grasoso y puede considerarse como aceite o grasa, y proviene de origen animal, vegetal o industrial. El segundo tipo es la suciedad sólida en forma de partículas solubles o no en agua.

Se denomina generalmente mancha a un depósito de material extraño localizado en un sitio, a menudo de color diferente al sustrato, que puede tener un carácter de suciedad líquida o sólida, o adherir al sustrato mediante enlaces químicos (colorantes, óxidos). En muchos casos, particularmente en lo que refiere a la suciedad doméstica, se observa una combinación de los diferentes tipos: grasoso, sólidos solubles, partículas insolubles.

- **Suciedad de grasosos.** Las glándulas sebáceas de la piel secretan una sustancia del mismo nombre cuyo papel es lubricar el sistema piloso, mantener la flexibilidad de la piel y retardar la penetración de sustancias extrañas en la dermis. Las secreciones sebáceas están en general en forma emulsionada con el sudor. Las secreciones sebáceas representan la mayor suciedad presente en la ropa y debe removerse completamente porque de alguna manera ayudan al atrapamiento de partículas sólidas y por hidrocarburos (principalmente escualeno), triglicéridos, ácidos grasos, esteres grasos y cantidades menores de otras sustancias como el colesterol. La Tabla 2.1.1 indica la composición típica de los lípidos de las secreciones sebáceas. El escualeno es un hidrocarburo acíclico insaturado que contiene seis unidades de isopreno. Su nombre deriva de la palabra *escualo* porque se encuentra en el aceite de hígado de tiburón. El escualeno se produce en las glándulas sebáceas y es un precursor de varios triterpenos cíclicos y de los esteroides relacionados.

Los aceites y grasas presentes en la suciedad de loza o de cocina son en su mayoría triglicéridos de origen animal o vegetal. La suciedad de grasosos industriales son, según la naturaleza de la industria, hidrocarburos, triglicéridos, o polímeros.

COMPOSICIÓN TÍPICA DE LAS SECRECIONES SEBÁCEAS

Sustancias:	Porcentajes
Triglicéridos	40 %
Mono/Diglicéridos	5 %
Acidos/Grasos	15 %
Esteres grasos	15 %
Escualeno	15 %
Colesterol	2 %
Otros	3 %

- **Suciedad de sólidos hidrosolubles.** La secreción de sudor es el proceso termoregulador del cuerpo humano y varía considerablemente según el tipo de actividad física. Las glándulas secretan un tipo de sudor particular a nivel de los poros sebáceos pilosos cuyo papel principal es el de emulsionar las secreciones sebáceas y facilitar su acción lubricante. Globalmente el sudor contiene típicamente 1 % de sólidos disueltos o suspendidos en solución coloidal. La mitad de estos sólidos son sales inorgánicas, principalmente cloruro de sodio (50 %), iones calcio, magnesio, hierro, potasio, yodo y azufre. El material orgánico contiene úrea (50 %), proteínas, carbohidratos, amoníaco y aminoácidos. La suciedad industrial como los sólidos hidrosolubles varían considerablemente con la naturaleza de la industria.
- **Suciedad de partículas sólidas.** Las partículas sólidas presentes en la ropa sucia pueden ser de origen orgánico (finas escamas de piel, proteínas, residuos vegetales o animales) o inorgánica (arcillas, partículas de humo, carbón, óxidos, cenizas). Las partículas orgánicas pueden adherirse sobre un sustrato orgánico (fibra) por enlaces de tipo químico, mientras que las partículas inorgánicas coloidales presentan a menudo una geometría muy compleja que favorece un atrapamiento físico, particularmente sobre el sustrato grasoso. A menudo intervienen también fuerzas electrostáticas de atracción. La deposición de partículas de suciedad en ambientes industriales está favorecida por la presencia de superficies porosas o rugosas (corrosión) o de películas grasosas. En ciertos casos la suciedad puede formar una costra sólida (escama) depositada por insolubilización (carbonato de calcio), condensación (calamina), o reacción química (calcinación). En estos casos la acción detergente debe acompañarse por un proceso mecánico de abrasión o de un proceso químico de

disolución.

- **Sustratos.** Los sustratos pueden clasificarse según su naturaleza química (superficie de alta o baja energía) que determina sus características eléctricas (doble capa) y su mojabilidad, pero también según su estructura geométrica (poros, fibras, área específica) que influye sobre ciertos aspectos físicos del proceso de remoción de suciedad (agitación).
- **Retención de suciedad.** La suciedad de líquidos, especialmente los aceitosos, pueden estar retenidos por fuerzas capilares, mientras que los sucios sólidos pueden estar retenidos por simples razones geométricas. Para completar los fenómenos físicos que originan la retención se debe también citar las fuerzas electrostáticas, aunque no tienen en general mucha importancia en un medio acuoso. La retención tanto de los líquidos como de los sólidos se debe principalmente a las fuerzas de adhesión de Van der Waals tanto de tipo polar como apolar. Tales fuerzas tienen mayor intensidad cuando las estructuras del sustrato y de la suciedad coinciden; por lo tanto la suciedad apolar (hidrocarburos, aceites) se adhiere más en los sustratos hidrofóbicos (poliéster, polietileno) que en los sustratos hidrofílicos (algodón, vidrio) y vice versa para la suciedad polar (ácidos grasos, arcillas). Finalmente la suciedad polar puede producir manchas de difícil remoción sobre sustratos polares, mediante una adhesión por puente hidrógeno.

2.1.2. Remoción de suciedad orgánica líquida

La remoción de suciedad orgánica líquida de un sustrato involucra varios mecanismos que actúan en forma separada o concurrente: cambio de mojabilidad, solubilización, emulsión. A continuación se empieza por repasar los conceptos elementales acerca de la mojabilidad.

- **Mojabilidad de una superficie.** Cuando una gota de líquido W (agua) se coloca sobre un sustrato sólido S (fibra, etc...) en el aire A , la gota se expande hasta tanto el contacto trifásico SWA presente un equilibrio entre las diferentes fuerzas de tensión (véase figura 2.1). El balance vectorial de las fuerzas de tensión

$$\gamma_{SA} + \gamma_{SW} + \gamma_{WA} = 0 \quad (2.1)$$

se escribe según la llamada ecuación de Neumann, en proyección sobre la normal a la interfase $S W$. El ángulo de contacto se mide dentro de la fase condensada W .

$$\gamma_{SA} = \gamma_{SW} + \gamma_{WA} \cos \theta \quad 0 < \theta < 180^\circ \quad (2.2)$$

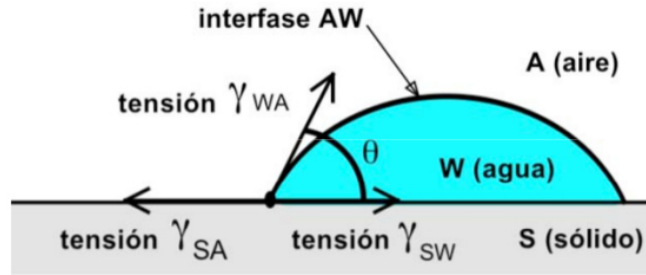


Figura 2.1: Tensiones involucradas en un equilibrio trifásico sobre un plano. Sustrato (S), agua (W), aire (A)

La fuerza de tensión entre W y A representa la tensión superficial, mientras que los términos para las interfases que involucran el sólido son las energías libres interfaciales, las cuales no pueden medirse directamente. Cuando menor el ángulo θ , mayor la mojabilidad del sólido S por el líquido W . Si θ tiende a cero la gota se extiende completamente, lo que ocurre cuando:

$$|\gamma_{SA}| \geq |\gamma_{WA}| + |\gamma_{SW}| \quad (2.3)$$

Tal condición de extensión puede satisfacerse eventualmente al disminuir la tensión interfacial entre W y A , lo cual produce siempre un aumento de la mojabilidad (descenso de θ) ya que:

En el otro caso extremo el ángulo de contacto θ llega a ser igual a 180° , y la gota es entonces tangente a la superficie, es decir que no la moja. Al despegar un área unitaria de la interfase $S W$, es decir al separar S de W , se forman dos nuevas interfases de área unitaria entre S y A de una parte, y W y A de otra parte. Cada una de las energías involucradas corresponde al producto de la tensión por el área. El trabajo de adhesión se define como la diferencia entre las energías después y antes de la separación de un área unitaria (Ecuación de Dupré):

$$W_{SW} = \gamma_{SA} + \gamma_{WA} - \gamma_{SW} \quad (2.4)$$

Combinando con la ecuación de Neumann, se obtiene la llamada ecuación de Young.

$$W_{SW} = \gamma_{WA}(1 + \cos \theta) \quad (2.5)$$

■ **Mecanismo de cambio de mojabilidad.**

En un caso típico de lavado el sustrato (S) está recubierto parcialmente por una suciedad orgánica líquido de tipo grasoso (O), y el conjunto baña en una fase acuosa (W). En tales circunstancias se encuentra una analogía formal con el caso anterior (véase figura 2.2).

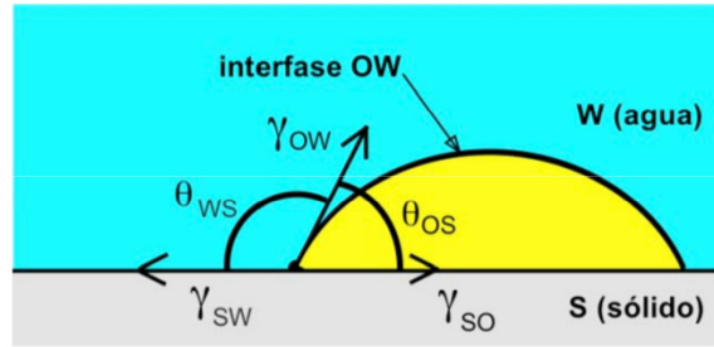


Figura 2.2: Angulos de contacto en un equilibrio trifásico sobre un plano. Sustrato (S), agua (W), aceite (O).

En el caso de la figura 2.2, el ángulo de contacto θ corresponde al ángulo de contacto entre O y S y se llama en forma general θ_{OS} . De igual forma se podría definir el ángulo de contacto entre W y S como el ángulo suplementario $\theta_{WS} = 180^\circ - \theta_{OS}$. En el caso de la figura $\theta_{OS} < 90^\circ$ y el sustrato es preferiblemente mojado por la fase orgánica. La ecuación de Neumann puede escribirse de dos formas:

$$\cos \theta_{OS} = (\gamma_{SW} - \gamma_{SO})/\gamma_{OW} \quad (2.6)$$

$$\cos \theta_{WS} = (\gamma_{SO} - \gamma_{SW})/\gamma_{OW} \quad (2.7)$$

Al introducir un surfactante en la fase acuosa pueden producirse varios cambios. La mayoría de los detergentes utilizados son muy poco solubles en la fase orgánica y por lo tanto la tensión γ_{SO} no está afectada. Por el contrario el surfactante se adsorbe en las interfases SW y OW y reduce ambas tensiones interfaciales. En consecuencia $\cos \theta_{WS}$ tiende a aumentar, es decir que el ángulo θ_{WS} disminuye o que la mojabilidad al agua aumenta. Esta situación llamada cambio de mojabilidad produce como efecto un encogimiento de la gota sobre sí misma, denominado *rolling up* en inglés (véase figura 2.3).

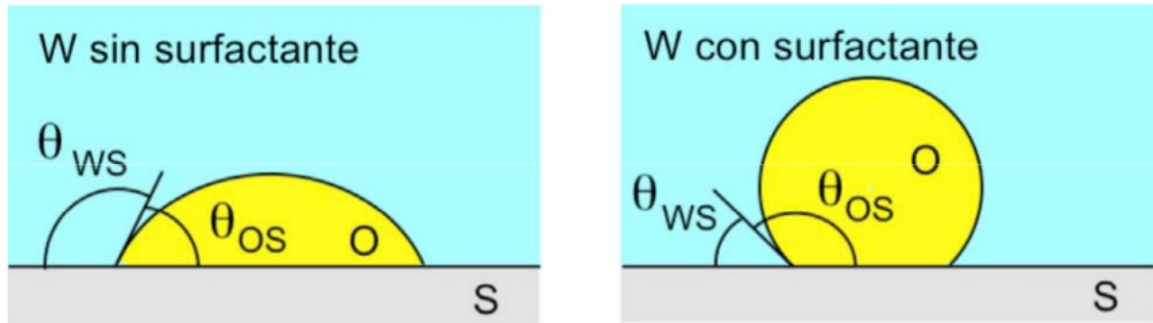


Figura 2.3: Encogimiento de una gota de sucio orgánico (O) por aumento de la mojabilidad del sustrato (S) por la fase acuosa (W) mediante adición de surfactante.

Cuando la mojabilidad del sustrato por la solución acuosa de surfactante es casi completa (θ_{WS} casi 0°) la gota de suciedad orgánica puede desprenderse fácilmente del sustrato bien sea por la fuerza de Arquímedes, bien sea por las fuerzas de cizallamiento producidas por la agitación mecánica del líquido W. Al desprenderse la gota, puede despegarse completamente, romperse en varias gotas, y eventualmente dejar un residuo de suciedad sobre el sustrato. La eficiencia del mecanismo de cambio de mojabilidad puede discutirse con las ecuaciones de Dupré y de Young, en función de la afinidad relativa del sucio orgánico por el sustrato, y de la disminución de tensión entre la fase orgánica y la fase acuosa.

$$W_{SO} = (1 + \cos \theta_{OS})\gamma_{WO} \quad (2.8)$$

$$W_{SO} = \gamma_{WO} + \gamma_{SW} - \gamma_{OS} \quad (2.9)$$

El trabajo de adhesión W_{SO} es una medida relativa de la afinidad de la fase orgánica

para el sustrato respecto a la afinidad de la fase acuosa para el sustrato W_{SO} disminuye cuando la polaridad del sustrato aumenta como por ejemplo en la serie: polietileno, cloruro de polivinilo, poliacrilonitrilo, poliamida. Para una misma solución detergente, una disminución de W_{SO} resulta en una disminución de $\cos \theta_{OS}$ es decir en un aumento de θ_{OS} o en un aumento de la mojabilidad al agua. De igual forma, la ecuación de Dupré indica que una disminución de W_{SO} resulta en una disminución de γ_{SW} y un aumento de γ_{SO} . Para un sustrato dado, la introducción de un surfactante reduce a la vez ambos términos $\cos \theta_{OS}$ y γ_{WO} , lo que resulta en una disminución de W_{SO} . El cambio de mojabilidad es probablemente el principal mecanismo de remoción de sucio orgánico líquido de un sustrato, pero existen otros.

- **Solubilización.** En solución acuosa las moléculas de surfactantes forman agregados llamados micelas. Las micelas pueden solubilizar moléculas orgánicas de varias formas (véase figura 2.4). Las sustancias de tipo hidrocarburos, y en general las sustancias netamente apolares, están solubilizadas en el interior o corazón de las micelas, el cual está constituido por las partes lipofílicas de las moléculas de surfactante.

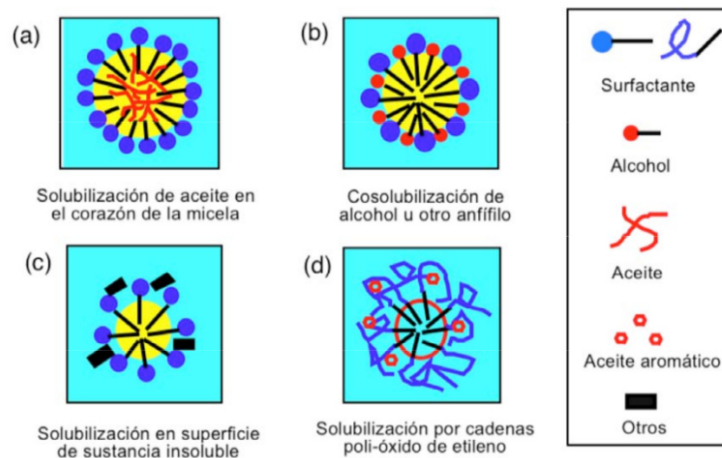


Figura 2.4: Existen varios tipos de solubilización micelar en agua: (a) de sustancia apolar, hidrocarburo, aceite...; (b) comicelización de un anfífilo, alcohol, amina ...; (c) de un sólido insoluble en ambas fases, talco, arcilla...; (d) de sustancias polares en cadenas poli-óxido de etileno

En cuanto a las moléculas orgánicas con cierto carácter polar (ácidos, alcoholes) se solubilizan en la superficie de la micela mediante un proceso conocido como comicelización. Si tal solubilización fuera el mecanismo principal de la detergencia, se debería observar un aumento del poder detergente con el número de micelas, y por

otra parte no ocurriría detergencia alguna a concentración de surfactante inferior a la concentración micelar crítica (CMC). Sin embargo no es así. En efecto se observa que el poder detergente aumenta con la concentración del surfactante hasta que este alcance la CMC; encima de la CMC el poder detergente es en general independiente de la concentración del surfactante. Tal observación indica que la acción detergente se debe a las moléculas no micelizadas del surfactante, es decir a la actividad interfacial (adsorción y cambio de mojabilidad del sustrato, disminución de la tensión) y no a la presencia de micela.

Por lo tanto el mecanismo de solubilización es probablemente poco importante en general. Sin embargo existe una excepción, que corresponde a la formación de cristales líquidos o mesofases. En estas circunstancias, el tamaño de las micelas puede crecer descomunadamente (hasta $0,1\mu m$) y se pueden formar geles o cristales líquidos, los cuales incorporan una considerable cantidad de fase acuosa y de fase orgánica. Un caso extremo de tales mesofases son las microemulsiones. La formación de tales estructuras está favorecidas por todos los factores que tienden a producir un aumento del tamaño micelar (o una disminución de la CMC) tales como electrolitos, acercamiento al punto de turbidez para los surfactantes no iónicos. Tales mesófases se producen siempre y cuando las afinidades del surfactante para las fases orgánica y acuosa están cerca del equilibrio, es decir cerca de la formulación óptima. Sin embargo eso no es la situación normal de uso de los detergentes comerciales, los cuales son en general netamente hidrofílicos.

2.1.3. Remoción de suciedad sólida (Partículas)

El mecanismo de remoción de partículas de suciedad sólida de un sustrato difiere completamente de aquel visto para la suciedad líquida. La retención de las partículas de suciedad proviene de la combinación de las fuerzas de atracción de Van der Waals y de las fuerzas eléctricas de repulsión; este problema está íntimamente relacionado con aquel de la floculación y de la coagulación de coloides hidrofóbicos, eventualmente con correcciones para tener en cuenta la hidratación de los sustratos celulósicos hidrofílicos o de partículas hidrofílicas como arcillas o sílice.

- **Efecto del surfactante.** La presencia de surfactante puede modificar el potencial de superficie por adsorción, modificar el valor de la constante de Hamaker, y afectar

la fuerza iónica del líquido dispersante (surfactante iónico) y como consecuencia el espesor de la doble capa eléctrica. Puesto que los surfactantes se usan en general a muy baja concentración, sólo el primer efecto puede ser significativo. Por ejemplo, la adición de un surfactante catiónico en un sistema en el cual ambos sustrato y partículas poseen una carga superficial negativa, tiende a disminuir el potencial superficial por adsorción, hasta llegar al punto de carga cero en el cual el potencial zeta se anula. En este punto se observa un máximo de coagulación. Si la adsorción de surfactante catiónico aumenta, el potencial superficial se torna positivo y aparece de nuevo una barrera energética. Al aumentar la concentración de surfactante catiónico más allá del punto de carga cero se observa por lo tanto una menor coagulación. Sin embargo esta tendencia está limitada por el aumento correspondiente de la fuerza iónica de la fase dispersante (surfactante fónico) que tiende a reducir el espesor de la doble capa eléctrica y por lo tanto producir el efecto inverso.

- **Otros efectos.** Las secciones anteriores indican que la presencia de un surfactante favorece la remoción de partículas por disminución de las energías superficiales. Sin embargo, la adsorción de surfactantes puede también reducir el potencial zeta y por lo tanto inhibir la remoción; por eso no se usan surfactantes iónicos de carga opuesta a la de los sólidos involucrados. Otros efectos importantes son los efectos estéricos de los surfactantes poliméricos que tienden a favorecer la dispersión de partículas al introducir términos de repulsión no-eléctrica.

Finalmente se debe notar que tanto en la remoción del sucio líquido por cambio de mojabilidad como en la remoción de partículas sólidas adheridas, se debe suministrar una cierta energía mecánica para vencer las fuerzas de adhesión. Es el papel de la agitación en las lavadoras u otros dispositivos de limpieza. Cuando más pequeño el tamaño de la gota o de la partícula a remover, mayor debe ser la agitación para que la sustancia a remover este sometida a un cizallamiento suficiente.

2.2. Transferencia de la suciedad

2.2.1. Flujo a través de las estructuras textiles

Es generalmente pensado que la rotación del tambor en las lavadoras genera suficiente flujo de líquido para obtener un apropiado aflojamiento y transferencia de suciedad. Sin

embargo desde que los textiles están formados de estructuras porosas muy complejas de fibras e hilos, la traslación de la rotación de un tambor dentro de un flujo entre los poros textiles es muy complicada. Una tela tejida es un medio bi-poroso con poros relativamente grandes entre los hilos y poros relativamente pequeños entre las fibras. La figura 2.5 muestra un esquema a diferentes escalas de la ubicación de los poros dentro de una estructura textil.

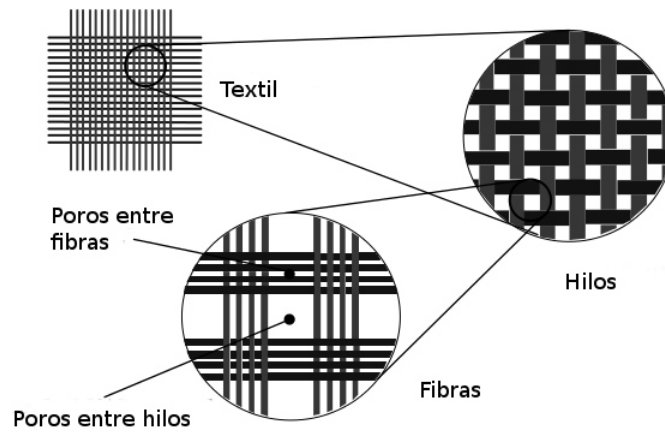


Figura 2.5: Estructura textil.

Van den Brekel y después Goojier [29] demostraron que la mayoría del flujo del líquido pasa a través de los poros entre los hilos sin penetrar dentro de los poros entre las fibras. Esto se debe a que la resistencia al flujo entre los poros relativamente pequeños es mucho más grande que la resistencia al flujo entre los poros relativamente grandes de los hilos. Posteriormente Warmoeskerken y Boom [29] introdujeron un modelo de núcleo estancado y cascara convectiva para describir el flujo a través del hilo. El núcleo estancado dentro del hilo es el área en la cual no existe flujo convectivo. La cascara convectiva es el área externa del hilo en la cual penetra el flujo en una mayor extensión. El modelo se muestra de forma esquemática en la figura 2.6.

Los procesos de transferencia en el núcleo estancado están basados en la difusión molecular mientras los procesos de transferencia en la cascara convectiva exterior están dados por difusión convectiva. Como la difusión convectiva es mucho más rápida que la difusión molecular, la tasa de remoción de suciedad estará determinada por el tamaño del núcleo estancado. Con el núcleo más pequeño el proceso de remoción de suciedad será más rápi-

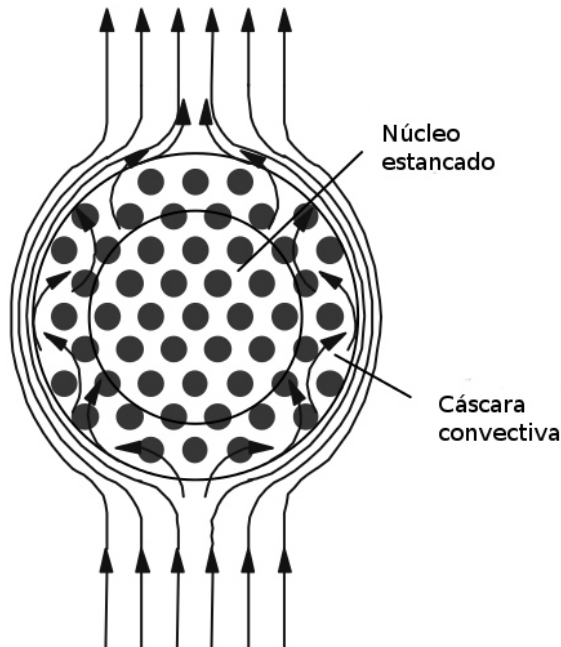


Figura 2.6: Flujo de líquido alrededor y a través de un hilo textil. Los puntos en la figura representan las fibras del hilo.

do. Esto significa que la tarea de la energía mecánica en un proceso de lavado es reducir el núcleo estancado al tamaño más pequeño posible. El mecanismo para la deformación de la estructura porosa en los textiles crea un efecto de exprimido. Durante la acción de rotación de las prendas textiles dentro del tambor de una lavadora que a su vez se encuentra rotando, los hilos en las telas serán deformados, torcidos, doblados y estirados como lo describieron Ganguli y Van Eendenburg [29]. Vander Donk [29] demostró en experimentos que la liberación de sal desde los poros de los hilos es acelerada en una gran extensión si los hilos son estirados. Sus hallazgos soportan también la idea de minimizar el núcleo estancado en hilos. Esto puede concluir que la principal tarea de la energía mecánica en un proceso de lavado es crear una deformación de textiles, resultando en una reducción de los núcleos estancados en hilos, en lugar de producir un fenómeno hidrodinámico de macro escala aleatoria.

Van den Brekel [27] concluyó que la transferencia de masa dentro de la estructura textil, se rige por un flujo convectivo relativamente rápido que pasa a través de los poros entre los hilos del orden de magnitud de $0,1 \text{ mm / s}$ y un flujo difusivo que pasa a través

de los poros entre las fibras de los hilos de un orden de magnitud de $0.1 \mu m/s$. Estas diferencias en la tasa de flujo de líquido se deben principalmente a las características de los materiales porosos [29]. La ecuación de Darcy es utilizada para describir el flujo laminar a través de los materiales porosos [31].

$$v_s = \frac{K}{\eta} \left(\frac{dP}{dx} \right) \quad (2.10)$$

Donde v_s es superficial del líquido, K la permeabilidad, η la viscosidad dinámica y $\frac{dP}{dx}$ el gradiente de presión. Reescribiendo la Ec. 2.10 resulta el modelo de Kozény:

$$v_s = \frac{1}{2\alpha^2} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2 a^2} \frac{1}{\eta} \left(\frac{dP}{dx} \right) \quad (2.11)$$

Donde α es la tortuosidad del medio poroso, a es $4/d$ con d siendo el diámetro del poro y ε la porosidad. Con el uso de las ecuaciones 2.10 y 2.13 el coeficiente de permeabilidad K puede escribirse como:

$$K = \frac{1}{K_0} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2 a^2} \quad (2.12)$$

Donde K_0 es la constante de Kozény. La constante de Kozény es un parámetro empírico que necesita ser determinado experimentalmente y es una medida de la tortuosidad y de la orientación del sistema de poros. La contribución de la permeabilidad de los poros entre los hilos ($K_{poros-entre-hilos}$) y los poros entre las fibras ($K_{poros-entre-fibras}$) pueden describir la permeabilidad general de los materiales textiles.

$$K = K_{poros-entre-hilos} (1 - \varepsilon_{poros-entre-hilos}) K_{poros-entre-fibras} \quad (2.13)$$

Asumiendo que K es constante para los poros entre los hilos y las fibras la contribución relativa de la permeabilidad entre los poros de los hilos y la permeabilidad entre los poros de las fibras puede ser estimada como sigue:

$$\frac{K_{poros-entre-hilos}}{K_{poros-entre-fibras}} = \frac{\varepsilon_{poros-entre-hilos}^3}{\varepsilon_{poros-entre-fibras}^3} \frac{(1 - \varepsilon_{poros-entre-fibras})^2 a_{poros-entre-fibras}^2}{(1 - \varepsilon_{poros-entre-hilos})^2 a_{poros-entre-hilos}^2} \quad (2.14)$$

Sustituyendo valores representativos de un material textil para diferentes parámetros, se encontró que [29].

$$\frac{K_{\text{poros-entre-hilos}}}{K_{\text{poros-entre-fibras}}} \approx 200 - 2000. \quad (2.15)$$

Esto ilustra que la convección y la difusión principalmente en los poros de las fibras determinan el tiempo en el proceso de lavado, desde el flujo del líquido y así el transporte de masa ocurre principalmente a través de los poros de los hilos [29].

2.2.2. Transferencia de masa

La transferencia de masa en los poros entre hilos y los poros entre fibras de la tela forman uno de los mecanismos físicos básicos de los procesos textiles húmedos tales como el lavado, teñido, blanqueo, mercerización y enjuague. Como en otros materiales porosos, tales como catalizadores, la transferencia de masa en los textiles también se produce por la convección y difusión en los poros de los textiles. Consideramos aquí el caso de los textiles con doble porosidad: porosidad entre hilos y porosidad entre fibras. Para el lavado, la transferencia de masa en estos materiales textiles se puede dividir en tres etapas distintas:

1. La transferencia de masa desde la región de los poros entre fibras en el núcleo estancado a la región de los poros entre hilos a través de la cascara convectiva en la periferia del hilo.
2. La transferencia de masa desde la región de los poros entre hilos de la capa límite entre el mayor líquido y la superficie textil.
3. La transferencia de masa de la capa límite al líquido a granel.

Perfiles de concentración típicos de la sustancia que se transportan a través del textil se muestra en la figura 2.7, junto con un diagrama esquemático de la estructura de la tela tejida. Como se puede deducir de la figura 2.7, los pasos de transferencia de masa se producen en serie. A fin de evaluar la contribución relativa de cada uno de estos pasos para el proceso global de transferencia de masa, uno necesita tener una idea de la naturaleza del flujo de fluido a través de los textiles. A fin de que encontrar el coeficiente global de transferencia de masa (K_T) en la industria textil, especificamos k_1 , k_2 y k_3 como los coeficientes de transferencia de masa individuales para el primer, segundo y tercer paso de transferencia de masa antes mencionada. K_T se puede determinar usando la relación familiar en la teoría de transferencia de masa:

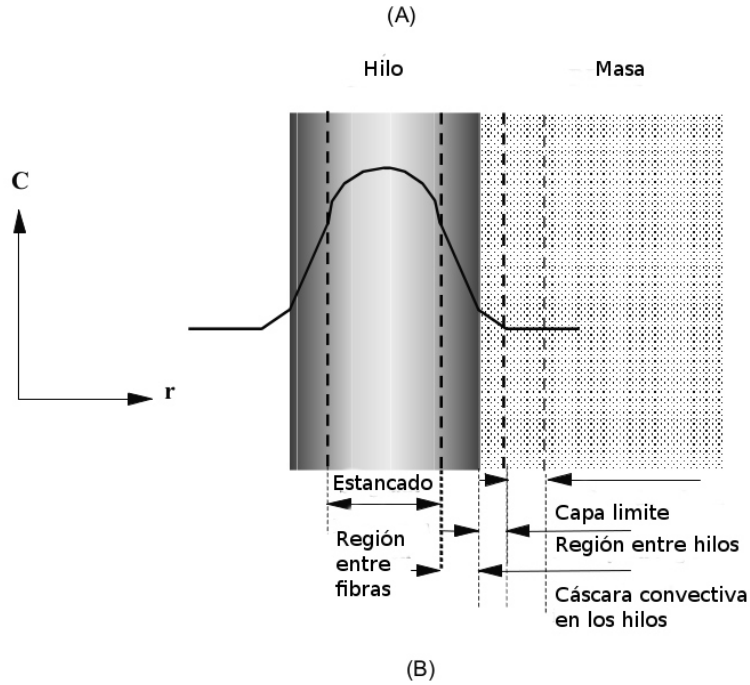


Figura 2.7: El mecanismo de transferencia de masa en los textiles. (A) Esquema que indica la estructura general y porosidad dual de los textiles; (B) Las tres etapas de la transferencia de masa en los materiales textiles y los perfiles de concentración típicos de la sustancia difusora.

$$\frac{1}{K_T} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad (2.16)$$

Hacemos un supuesto de que la transferencia de masa en la tercera etapa (de la capa límite a la masa) es muy rápido en comparación a los otros pasos. Ahora, para estimar las magnitudes relativas de k_1 y k_2 , utilizamos las correlaciones de transferencia de masa desarrollados para un lecho empaquetado. Varias correlaciones para los coeficientes de transferencia de masa se enumeran por Janssen y Warmoeskerken (1997) [30]. Un único hilo puede ser descrito como un cilindro. Para estimar el coeficiente de transferencia de masa entre hilo, elegimos la siguiente correlación para cilindros largos de paso de flujo perpendiculares al flujo:

$$\langle Sh \rangle = 0.42Sc^{1/5} + 0.57Re^{1/2}Sc^{1/3} \quad 1 < Re < 10^4; Sc > 0.7; Pe \gg 1. \quad (2.17)$$

Los números adimensionales están definidos como:

$$Re = \frac{\rho_L \bar{v} d_y}{\mu}; \quad Sh = \frac{k d_y}{D}; \quad Pe = \frac{\bar{v} d_y}{D} \quad (2.18)$$

Para estimar el coeficiente de transferencia de masa entre hilo, se sustituyen los siguientes valores representativos de la correlación anterior: $\bar{v} = 2 \text{ cm/s}$; $d_y = 250 \text{ }\mu\text{m}$; $\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3$; $D = 1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$; $\varepsilon = 0,5$ y $Sc \approx 1000$. Sustituyendo los valores anteriores, se encuentra que $Sh \approx 25$, y de la definición del número de Sherwood se deduce que $k_2 \approx 1,4 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$. Para estimar el coeficiente de transferencia de masa en el interior del hilo, hacemos uso de la análisis dado por Masui et al. (1978) [30], que ha demostrado que para tiempos de contacto más largos [$Dt/d_y^2 \gg 1$] el número de *Sherwood* ≈ 5.8 . Debido a la estructura porosa de los hilos, el coeficiente efectivo de difusión en el interior del hilo es menor que el coeficiente de difusión real. Por lo tanto, se usa la corrección propuesta por Rietema (1976) [30] para estimar el coeficiente de difusión eficaz en un medio poroso:

$$D_e = \frac{\varepsilon_y}{\alpha^2} D \quad (2.19)$$

La sustitución de los valores representativos de ε_y y α (factor de tortuosidad) como 0,4 y 2 respectivamente, da $D_e \approx 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$. El coeficiente de transferencia de masa en el interior del hilo (K_1) se calcula a partir del número de Sherwood como $\approx 4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. La relación de k_1 y k_2 nos da una idea del proceso de transferencia de masa en los textiles: 97 % de la resistencia de transferencia de masa está determinada por el proceso de difusión en el interior de los hilos. Como tal, la transferencia de masa por difusión en el hilo es el paso limitante en la transferencia de masa total en la industria textil. Esto también implica que la mejora de la transferencia de masa en el textile requeriría la reducción de la zona de estancamiento en los hilos o en otras palabras la conversión del proceso de difusión a través de los poros entre fibras en una convección más rápida.

2.3. Diseño del dispositivo de lavado

Se creo un sistema simplificado capaz de generar condiciones de agitación de forma controlada equiparable al que se presenta en una tina de lavado comercial. El sistema cuenta con un sistema de calefacción para controlar la temperatura del flujo en el dispositivo de agitación. El dispositivo de lavado tiene integrados los controles de agitación y

temperatura.

La idea fundamental es evaluar las ventajas del uso del detergente *A* por lo cual se debe comparar entre muestras lavadas bajo las mismas circunstancias, en agitación, tiempo, temperatura, tipo de mancha, concentración y fijación de la mancha.

Para resolver el problema de la agitación se sometieron las muestras a una condición hidrodinámica controlada y repetible. Una solución es montar las muestras para que queden expuestas a un flujo paralelo con una velocidad y una intensidad de turbulencia fijas. Esto se puede lograr haciendo correr el agua con detergente a una velocidad y con intensidad de turbulencia fijas.

Se construyó un circuito hidráulico por el cual se hace circular detergente a una velocidad fija, donde se colocan mallas metálicas para generar turbulencia aguas arriba de la zona de prueba. Esto permite asegurar que la intensidad de turbulencia a la que se someten las muestras es estadísticamente la misma si la velocidad de flujo es la misma. Para asegurar que la velocidad en la zona de prueba sea constante en el lavado se requiere mantener una carga hidráulica constante, lo cual se puede lograr razonablemente bien con una bomba hidráulica con una capacidad de 1Hp. Para controlar la velocidad se puede usar una válvula de globo que deberá abrir o cerrar en función del flujo que circula en el circuito hidráulico.

Dos depósitos forman parte del circuito hidráulico, uno de agua-detergente y otro agua-limpia. La bomba deberá impulsar un flujo proveniente del depósito de agua con detergente durante un tiempo previamente definido, lo que constituye la etapa de lavado. Adicionalmente, es necesario instrumentar el dispositivo para conocer la temperatura del agua con detergente, y en caso necesario, generar un calentamiento mediante una resistencia eléctrica. Al concluir la etapa de lavado, la bomba deberá impulsar agua proveniente del depósito de agua limpia, lo que constituye la etapa de enjuague.

El depósito que contiene el agua con detergente cuenta con un *RTD* para medir la temperatura y una resistencia eléctrica de inmersión para calentar la mezcla en caso de ser necesario. Una vez que se tenga la temperatura requerida en el agua con detergente el sistema debe impulsar agua con detergente por un tiempo establecido de lavado, controlando en todo momento la velocidad a través de la zona de prueba mediante una válvula electrónica que es gobernada mediante un sistema de control que le indica si es necesario abrir o cerrar en función de la información que se obtiene de un caudalímetro electrónico que se colocará en el circuito para conocer el flujo que circula en el circuito hidráulico. Al

transcurrir el tiempo de lavado debe cerrarse una válvula electrónica que comunica la bomba con el depósito de detergente, y deberá abrir una válvula que comunica la bomba con el agua limpia. También deberá cerrar una válvula que permite el retorno hacia el depósito de agua con detergente y debe abrir otra válvula que permite el retorno hacia el depósito de agua limpia. El sistema antes propuesto se ilustra en la figura 2.8.

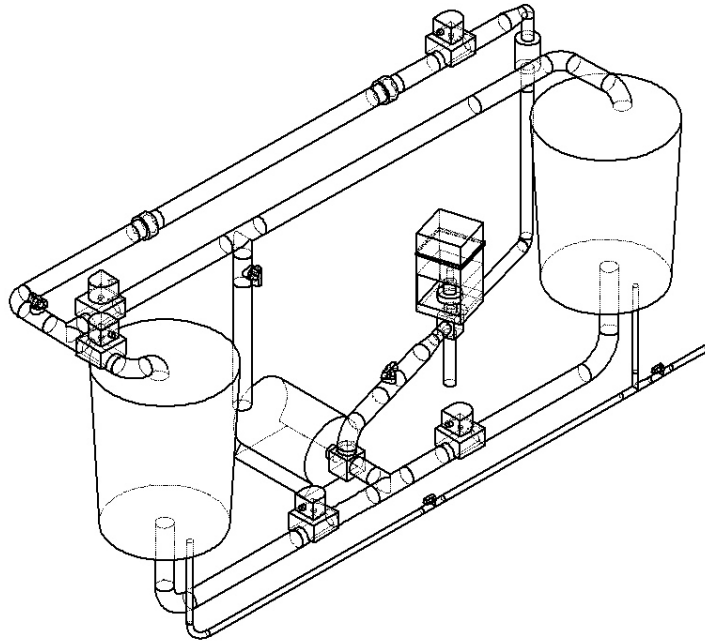
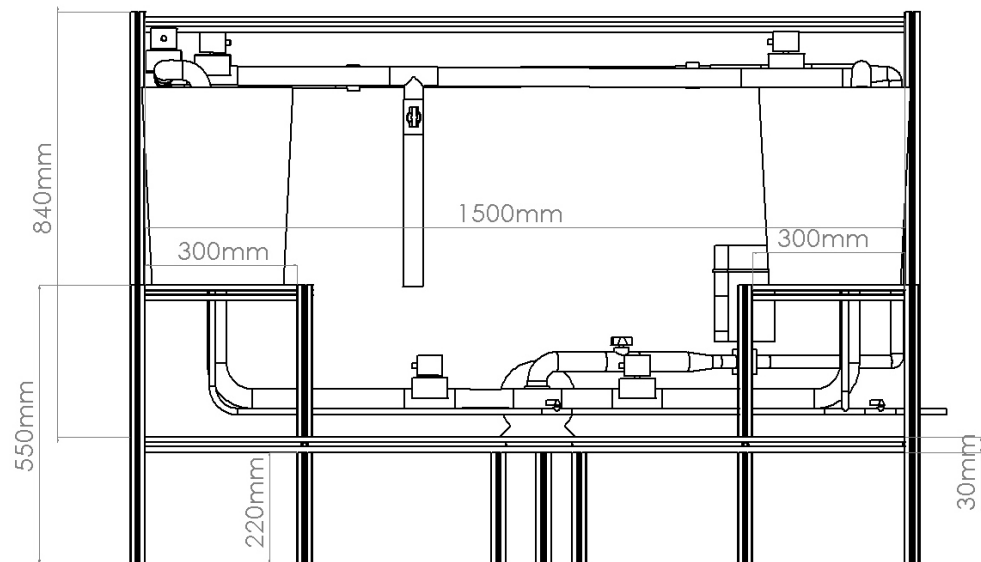
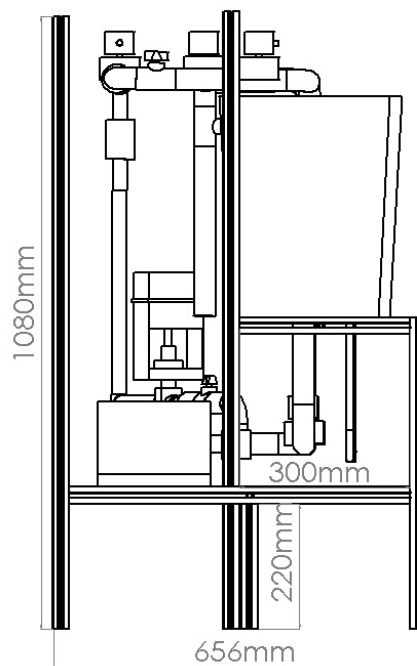


Figura 2.8: Sistema de lavado

Las dimensiones del dispositivo de lavado diseñado se muestran con acotaciones en la figura 2.9 de vista frontal y en la figura 2.10 en vista lateral izquierda.

Los principales elementos que constituyen al sistema de lavado diseñado, además de su instalación se ilustran con cierto detalle en la figura 2.11. La *sección de prueba se muestra (Ver figura 2.11) como un tramo de tubería recto*. Se diseñó el circuito hidráulico de tal forma que se puede construir de tubería de PVC de 1 pulg de diámetro; únicamente la sección de prueba y la sección previa en la que se colocan las rejillas de agitación son de diámetro 1.5 pulg. Las dimensiones se seleccionaron de esa forma al dimensionar la capacidad de la bomba hidráulica, que en este caso es de 90 lt/min. Esto permite lograr velocidades de 1 m/s en la sección de prueba, velocidad relativa típica en el proceso de agitación en una lavadora comercial.

Se instaló un sistema de calefacción para controlar la temperatura del flujo y se di-

**Figura 2.9:** Vista frontal del sistema de lavado**Figura 2.10:** Vista lateral izquierda del sistema de lavado

señó la estrategia para acoplar de forma integral los controles de agitación y temperatura en el dispositivo de lavado.

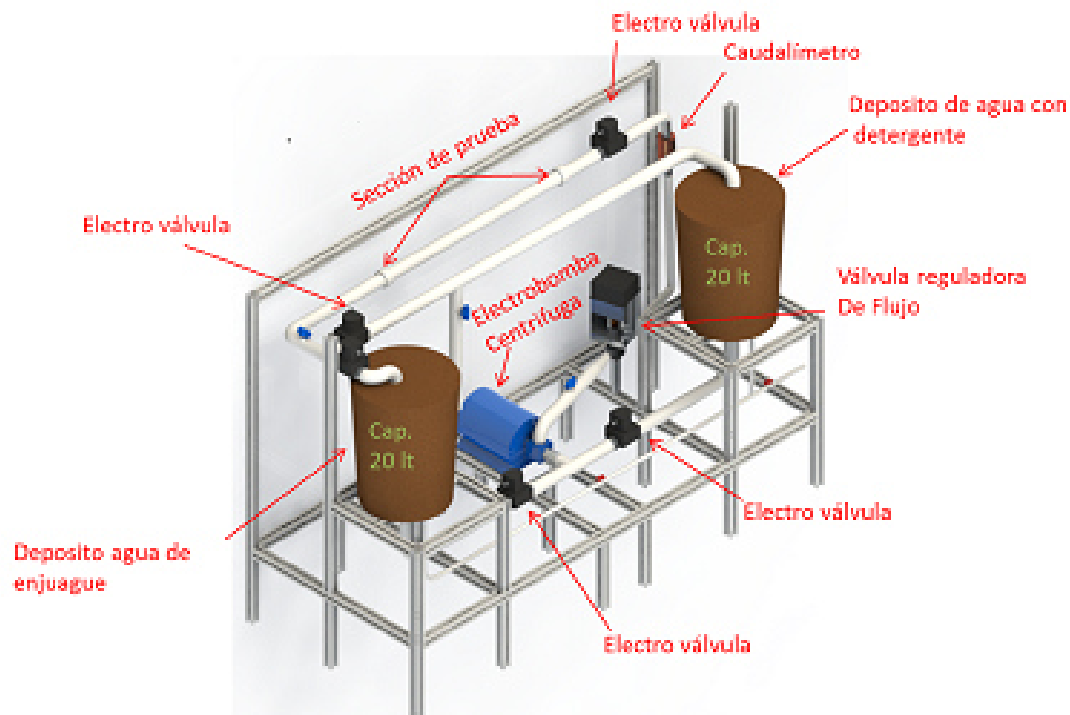


Figura 2.11: Esquema que ilustra los componentes del sistema de lavado

2.3.1. Construcción del dispositivo de lavado

Se llevó a cabo la selección y adquisición del material, se llevó a acabo la tarea de manufactura del dispositivo y se procedió a la instrumentación del mismo.

La figura 2.12 muestra las mallas de aluminio que se colocan para producir la turbulencia aguas arriba de la sección de pruebas.

El sistema de lavado construido en los laboratorios de investigación e innovación en tecnología energética se muestra en la figura 2.13. En esta imagen se puede apreciar la distribución de los componentes que se describen a detalle en el Anexo al final de este documento. Las figura 2.14 muestra una cara laterale del sistema de lavado.

Se muestran también algunas válvulas de cierre manual que se incluyeron para resolver



(a) Muestra las mallas para generar (b) Muestra la instalación de las ma-
agitación en la zona de prueba y un llas dentro del dispositivo.
dispositivo diseñado para instalar las
mallas dentro de la sección de prue-
bas.

Figura 2.12: Mallas para generación de agitación en la zona de pruebas.

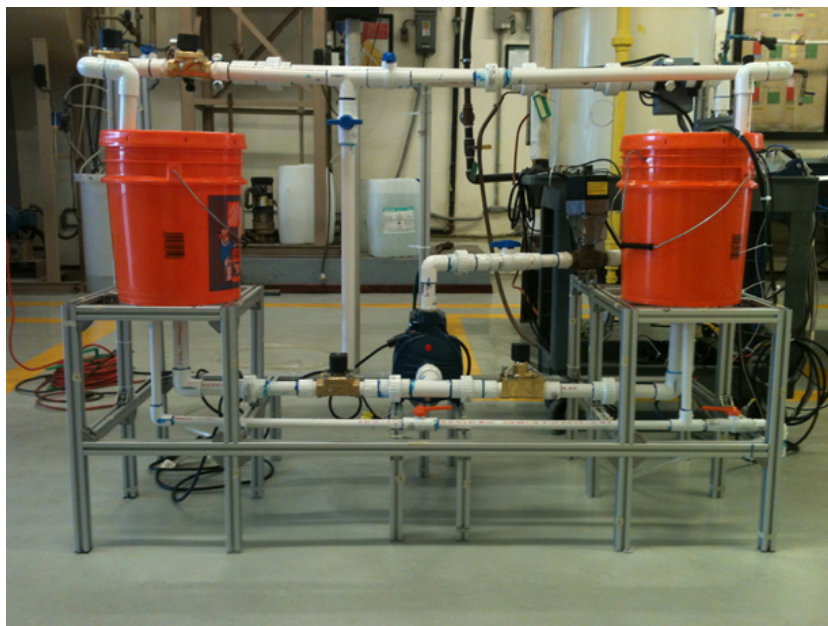


Figura 2.13: Vista frontal del Sistema de lavado

eventualidades durante el desarrollo y la prueba del algoritmo de control.

El sistema de control de este sistema de lavado es completamente electrónico y es gobernado mediante un controlador en tiempo real programado mediante un software de programación visual gráfico, además de guardar registro de las condiciones de la prueba mediante un sistema de adquisición de datos.

Con el uso del software de programación visual gráfico se desarrollaron *instrumen-*



Figura 2.14: Vista lateral izquierda del Sistema de lavado

tos virtuales, de adquisición de datos y control dinámico, donde se programa el tiempo de duración de los ciclos de lavado y enjuague, además de la temperatura de lavado y la velocidad en la sección de prueba. Al iniciar el programa la secuencia de arranque, calentamiento de agua, apertura y cierre de válvulas se controlan mediante una *PC* conectada vía Ethernet al equipo y al controlador mediante *USB* al sistema de adquisición de datos.

2.3.2. Sistema de control

El ciclo de lavado se realiza en 4 etapas que son descritas a continuación:

1. **PRECALENTAMIENTO.** Mediante una resistencia eléctrica se eleva la temperatura del agua con detergente hasta el nivel deseado: 25 °C ó 50 °C. La estrategia de control implementada es un lazo cerrado del tipo encendido/apagado, es decir, cuando la temperatura alcanza un límite máximo la resistencia se apaga, cuando la temperatura baja de un límite mínimo se enciende. La resistencia tiene una potencia de 3 KW y es controlada mediante modulación de ancho de pulso gestionada por un circuito de control que recibe una consigna de 4-20mA correspondiente linealmente con una potencia eléctrica de 0 - 100 %. La consigna es proporcionada desde software mediante un autómatas programable de automatización (PAC).

2. LAVADO. Una vez que la temperatura se iguala a la consigna, las válvulas que controlan el flujo de la mezcla de agua con detergente se abren y la bomba comienza a funcionar impulsando la mezcla a la zona de lavado, al transcurrir el tiempo asignado (que puede ser entre 8 o 10 minutos) la bomba se detiene y las válvulas de paso se cierran. La velocidad en la zona de lavado se ha limitado a dos condiciones que son alta (1 m/s) y baja (0.7 m/s); la regulación de la velocidad se realiza mediante un control PI que esta implementado en un lazo cerrado. La velocidad es determinada con un caudalímetro electromagnético que envía una señal de 4-20mA al PAC, que tiene cargado el programa de control. El control *PI* determina el porcentaje de cierre de una válvula de control, que recibe una consigna en corriente continua de 4-20mA que corresponde con el 0-100 % de apertura. Las válvulas que permiten el flujo de la mezcla son válvulas de paso normalmente cerradas cuyo vástago esta acoplado a un solenoide, que se energiza con 120 VAC, mediante un relevador de potencia las válvulas se activan al recibir la señal de control desde el software de control a través del sistema de adquisición de datos.

PRE-ENJUAGUE. Cuando el lavado termina hay una gran cantidad de detergente con agua en la instalación, un ciclo de pre-enjuague es efectuado para remover el detergente. Para ello se habilitan la válvula de paso instalada en la línea de agua limpia en la succión de la válvula y un desvío hacia un recipiente colector, se abren éstas válvulas energizando sus respectivos solenoides y se enciende la bomba de agua durante 8 segundos, después de los cuales se apaga la bomba y se cierran las válvulas.

ENJUAGUE. El ciclo de enjuague inicia al abrir las válvulas de paso de agua limpia, la bomba se activa y circula agua a la velocidad deseada (1 m/s o 0.7 m/s) durante 3 minutos, al término de los cuales se apaga la bomba y se cierran las válvulas de paso. El encendido de la bomba y la apertura de las válvulas de paso se realiza mediante relevadores que reciben una entrada de 12 VDC para la bomba y 5 VDC para las válvulas; la señal de conmutación es enviada por dos módulos de salidas digitales controladas por el sistema de adquisición de datos.

2.3.3. Pruebas de repetibilidad del dispositivo de lavado

Se realizaron pruebas del funcionamiento del dispositivo observando la repetibilidad de las condiciones que caracterizan los ciclos de lavado. En esta actividad se documentó la capacidad de llevar a cabo ciclos de lavado con condiciones controladas y con un grado

de repetibilidad que permite comparar de forma objetiva las diferencias en la eficacia de lavado con distinta duración de los ciclos, el uso de agua caliente, intensidad de agitación y el tipo de ensuciamiento.

La figura 2.15 ilustra el montaje de las muestras textiles para el lavado. Como se puede apreciar, las muestras quedan extendidas y soportadas por un bastidor de aluminio que se coloca en el interior de la zona de prueba. Las muestra se atornillaron al bastidor de aluminio para sujetarlas en el lavado.

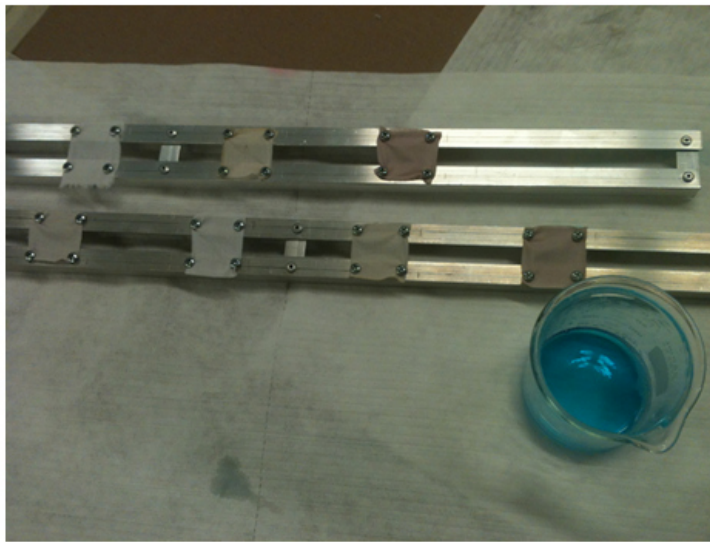


Figura 2.15: Muestras montadas en un bastidor para exponerlo a la corriente de agua en la zona de prueba

En cada una de las pruebas de lavado se midió la dosificación del detergente con la ayuda de una jeringa, como se muestra en la figura 2.16, y de forma consistente con el diseño de experimentos acordado con la parte técnica del centro tecnológico que desarrolló el detergente A.

Mediante el software de adquisición de datos se pusieron en operación los *instrumentos virtuales*, de adquisición de datos y control dinámico, donde se probaron los programas de lavado con distintos tiempos de duración de los ciclos de lavado y enjuague.

Una vez cumplida la tarea de caracterizar y revisar la operación del dispositivo de lavado, se creó un instrumento virtual para controlar automáticamente el proceso de lavado, figura 2.17, de acuerdo a los parámetros que definen en el diseño de experimentos.

Adicionalmente, se revisó la confiabilidad del sistema para controlar la temperatura de lavado y la velocidad en la sección de prueba. Se tuvo especial cuidado en verificar

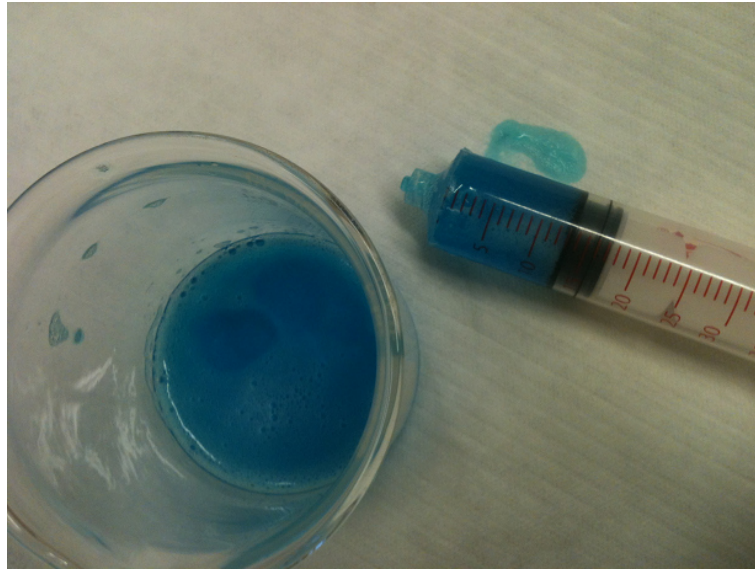


Figura 2.16: Dosificación del detergente para las pruebas físicas

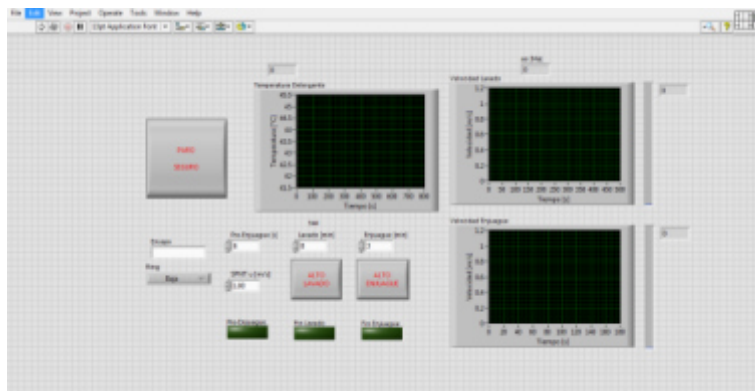


Figura 2.17: Pantalla que muestra un instrumento virtual que controla automáticamente todos los actuadores del sistema de forma consistente con el programa de lavado

la repetibilidad de los programas de la secuencia de arranque, calentamiento de agua, apertura y cierre de válvulas.

Capítulo 3

Dispositivo para evaluar el grado de limpieza en una muestra textil

En esta actividad se trabajó para definir una forma de evaluación del grado de limpieza mediante técnicas ópticas. Se trabajó en la aplicación de técnicas basadas en el tratamiento de imágenes obtenidas mediante fotografía digital para la identificación de coloración a través de la comparación de los histogramas cromáticos de imágenes digitales.

3.1. Diseño y construcción de un dispositivo para evaluar el grado de limpieza mediante técnicas ópticas

Se diseñó un dispositivo de uso práctico, confiable, y con un grado aceptable de repetibilidad para evaluar el grado de limpieza mediante la aplicación de la estrategia antes mencionada. Se construyó el dispositivo para la medición del grado de limpieza de muestras textiles que se empleó de manera sistemática en esta investigación para poder comparar de manera cuantitativa la efectividad de distintas condiciones de lavado. El dispositivo se muestra en la figura 3.1.

Para realizar la evaluación de la limpieza de las muestras se diseñó considerando la posibilidad de realizar una comparación entre dos imágenes que correspondan a dos muestras distintas. Para que la comparación de las fotografías sea válida las muestras deben ser fotografiadas bajo las mismas condiciones, incluyendo iluminación, enfoque y tiempo de exposición. Las restricciones anteriores se resolvieron de la siguiente manera:

- Iluminación. Este problema se puede resolver si el proceso de fotografía se realiza dentro de una cámara oscura en la que se cuente con una única fuente de iluminación con intensidad continua y que ilumina la muestra a fotografías de manera uniforme.

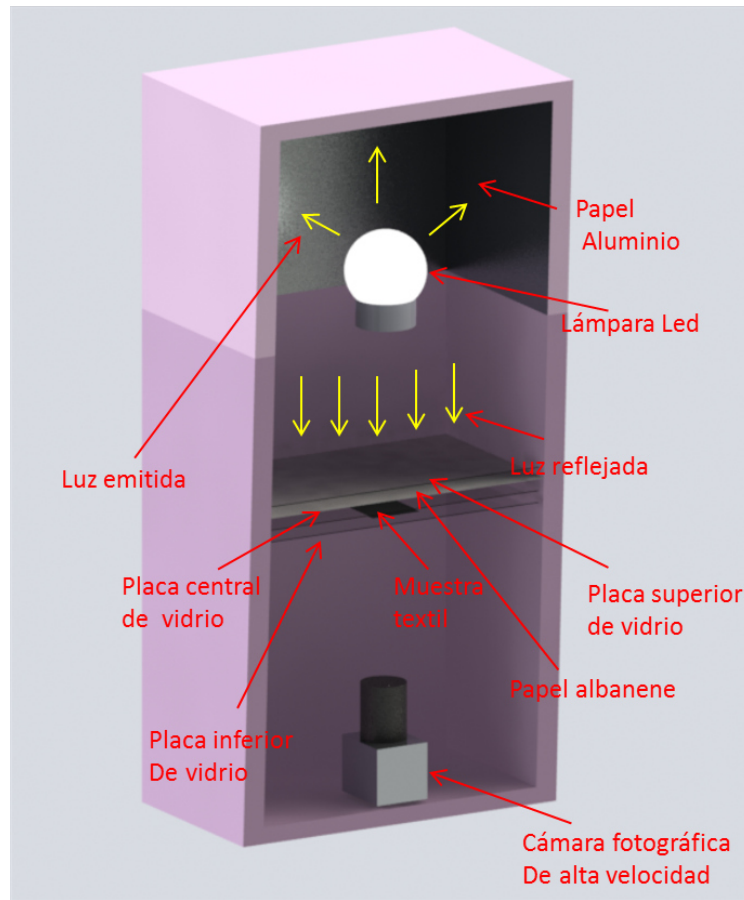


Figura 3.1: Camara oscura

- Enfoque. Se resuelve fijando de manera rígida la cámara que toma las imágenes de las muestras. Debe realizarse el enfoque de la muestra de tal forma que sea posible identificar detalles como las texturas de la muestra de manera tal que se tenga la certeza de que el enfoque es el mismo en el fotografiado de cada muestra. Entonces, es necesario definir una manera de colocar las muestras de manera rígida para que la cámara se enfoque una sola vez y ese enfoque sea constante, de tal suerte que la cámara *capte* las distintas muestras bajo las mismas condiciones.

- Tiempo de exposición. Para controlar este aspecto se puede utilizar una cámara que tenga la posibilidad de controlar el tiempo de exposición de manera confiable y personalizada. Se puede entonces utilizar una cámara controlada mediante una computadora.

Para resolver de forma conjunta estos tres aspectos se construyó una estructura rígida

de aluminio, donde se coloca la cámara fotográfica de forma rígida.

Procesamiento digital de imágenes. El procesamiento digital de imágenes ó PDI es el tratamiento de imágenes mediante medios electrónicos y su aplicación incluye diversas áreas como, la medicina, la manufactura, microscopía, análisis de imágenes satelitales, sistemas de seguridad, astronomía, etc.

Un aspecto importante de PDI es que las imágenes con que se trabaja no provienen únicamente del sensado del espectro de luz visible a la cual responde el ojo humano, las imágenes pueden provenir del sensado de cualquier área del espectro electromagnético. Esto representa una gran ventaja ya que los sistemas que incorporan la fase del PDI no están limitados únicamente a las imágenes que puedan ser capturadas por el ojo humano. Existen actualmente sistemas que realizan PDI sobre imágenes generadas mediante el sensado de, rayos X, rayos gama, energía ultravioleta, infrarrojo, microondas, y ondas de radio, prácticamente todo el espectro electromagnético. El rango de la luz visible es solo una pequeña parte del espectro electromagnético, por lo que el querer trabajar con imágenes adquiridas en otros rangos del espectro enriquece la aplicabilidad del PDI y permiten visualizar información distinta al sensar diferente tipo de energía de una misma escena [28]. Para llevar a cabo el PDI en la presente investigación se empleó una cámara fotográfica con las características que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Especificaciones de la cámara fotográfica utilizada para la adquisición de imágenes

Sensor:	CMOS
Color:	Monocromática
Resolución:	512x512 pixel
Tomas por segundo:	5140 fps
Máxima velocidad:	140.000 fps
Conexión:	Pc via USB
Memoria:	4 GB

Esta cámara en particular puede ser operada mediante un software que permite controlar el tiempo de exposición y se puede sincronizar con señales electrónicas para su disparo.

Al ser de tipo monocromático solamente fotografía en escala de grises. En la cámara se montó una óptica de 60 mm.

Por facilidad en la construcción y manejo, se coloca la cámara en la parte inferior de la estructura y se colocan placas de vidrio, sobre las que se colocan las muestras textiles, a una distancia adecuada para lograr un enfoque satisfactorio. Se emplearon tres placas de vidrio de uso corriente de 6 mm de espesor. En la parte superior de la cámara oscura se coloca una lámpara led de 4 W. En la tapa superior se coloca papel aluminio y se hace que la lámpara ilumine en dirección opuesta a la cámara para hacer que la luz se refleje en el papel aluminio de la tapa superior de la cámara. La luz que ha sido reflejada en el papel aluminio se hace pasar a través de una hoja de papel albanene para dispersar la luz antes de iluminar las muestras. El objeto de la estrategia anterior es iluminar de manera uniforme las muestras textiles, evitando brillos.

La figura 3.2 muestra la colocación de la primera placa de vidrio, sobre la que se colocan las muestras textiles. Encima de las muestras se coloca una segunda placa de vidrio que tiene la tarea de *planchar* las muestras para evitar la aparición de arrugas. Encima de esta placa se coloca el papel albanene para facilitar la dispersión de la luz, facilitando la distribución de la iluminación y evitar la aparición de brillos, como se observa en la figura 3.3.

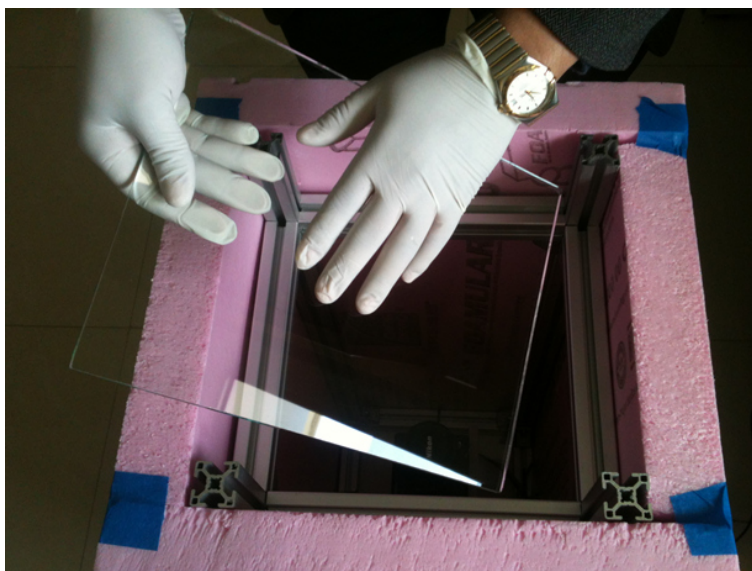


Figura 3.2: Colocación de la primera placa de vidrio



Figura 3.3: Colocación de la hoja de papel albanene para disipar la luz de vidrio

La figura 3.4 muestra la colocación de la tercera placa de vidrio que *plancha* al papel albanene favoreciendo la distribución de la luz.



Figura 3.4: Colocación de la tercera placa de vidrio

Las muestras quedan colocadas de la manera que se muestra en la figura 3.5. En este caso la cámara está colocada de tal forma que su óptica está ubicada a 0.3 m de la muestra

textil.

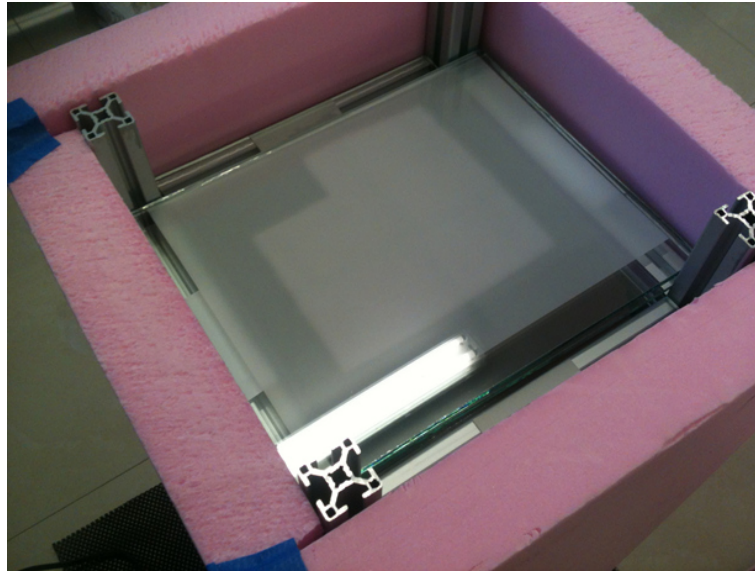


Figura 3.5: Conjunto de muestras de textil colocada en las placas para pruebas de blancura

La figura 3.6 muestra el interior de la tapa de la cámara oscura donde se refleja la luz con la ayuda de papel aluminio. Se observa a la izquierda la tapa con la luz led apagada y a la derecha con la luz led encendida.



Figura 3.6: Imagen que muestra la tapa de la cámara oscura donde se refleja la luz

3.2. Calibración del sistema de adquisición de imágenes

Se trabajó en la calibración del dispositivo para evaluar el grado de limpieza de las muestras. Para ello se desarrolló y aplicó una estrategia que permite evaluar de manera formal el grado de limpieza con base al nivel de blancura expresado a través de un valor numérico obtenido estadísticamente, y susceptible de poder ser comparado con repetibilidad en la medición.

Para lograr que la estrategia funcione adecuadamente fue necesario llevar a cabo el proceso de calibración, incluyendo pruebas que permiten asegurar que el enfoque es adecuado para el fin que se persigue. La imagen de la izquierda en la figura 3.7 muestra la colocación de una regla transparente sobre la superficie en la que descansarán las muestras textiles. La tarea entonces es lograr el mejor enfoque posible de la regla. En la imagen de la derecha de la figura 3.7 se puede apreciar una fotografía tomada por la cámara en la que se muestra un enfoque nítido satisfactorio.

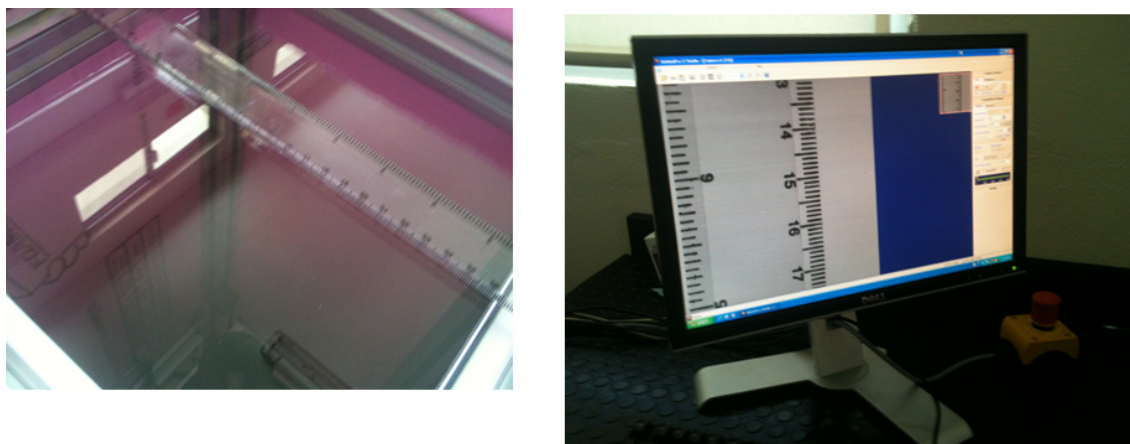


Figura 3.7: Uso de una regla para asegurar el enfoque de la cámara de video

Una vez que el enfoque está asegurado, se fija la primera placa de vidrio para evitar cambios en las imágenes. Es posible entonces cerrar la cámara y utilizar la lámpara led para iluminar las muestras. La figura 3.8 presenta la imagen de una muestra textil en la que es posible apreciar detalles del tejido de la muestra, lo que permite asegurar que en efecto la cámara ha sido correctamente enfocada, además de permitir observar que existe una distribución uniforme de la luz en toda la muestra.

La figura 3.9 muestra un par de cintas negras colocadas cuidadosamente sobre la su-

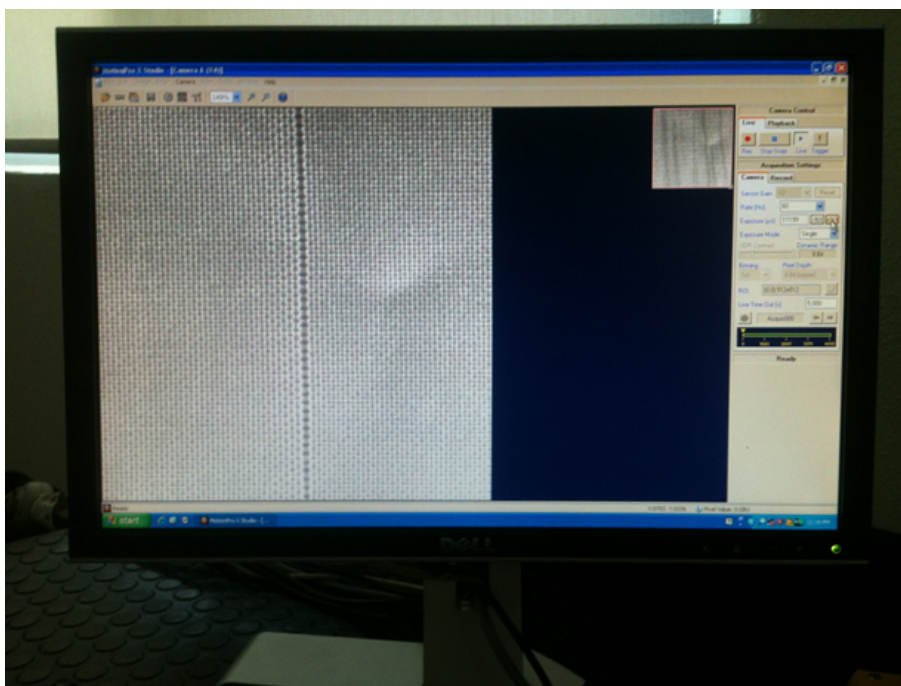


Figura 3.8: Pantalla que muestra la imagen de una muestra textil una vez que se ha enfocado la cámara de video

perficie en la que se colocarán las muestras. Las cintas se colocan en forma de cruz, de manera tal que en cada uno de los cuadrantes se colocarán muestras distintas que podrán ser fotografiadas en una sola imagen sin que se afecten entre sí, como se muestra en la figura 3.10

La figura 3.11 muestra una imagen de la interfaz gráfica que controla la cámara de video; se pueden apreciar los cuatro cuadrantes con muestras en las que se pueden identificar incluso los patrones textiles.

Las imágenes digitales obtenidas con el dispositivo antes descrito son susceptibles de poder ser utilizadas mediante programas de análisis de imagen o análisis numérico para poder determinar la coloración local de las muestras. Se pretende identificar y evaluar la blancura de una muestra a través de una comparación numérica con otra *muestra patrón* que se emplea como parámetro. La figura 3.12 muestra una imagen en la que se aprecian dos fotografías de muestras textiles, además, se puede ver el perfil de la coloración que tienen. Las líneas que aparecen son las gráficas de la coloración en la dirección vertical y horizontal. Se puede apreciar que el tejido genera una variación importante en la colora-

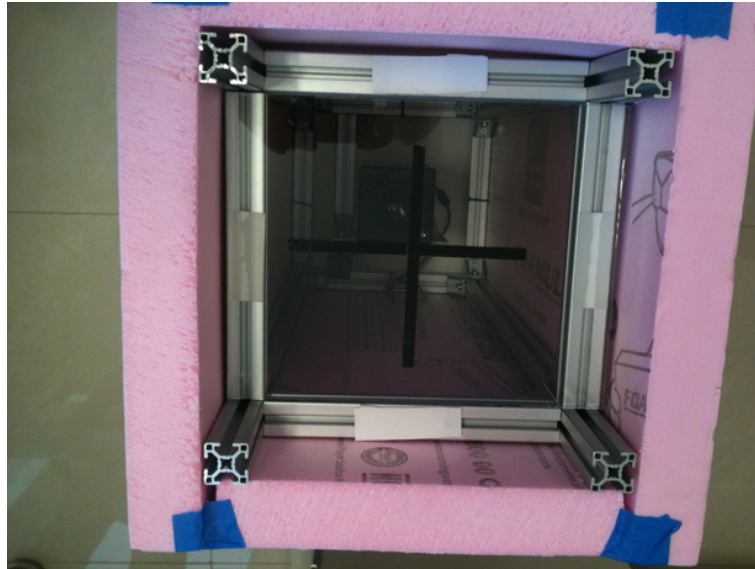


Figura 3.9: Imagen que muestra la distribución por cuadrantes de las imágenes digitales

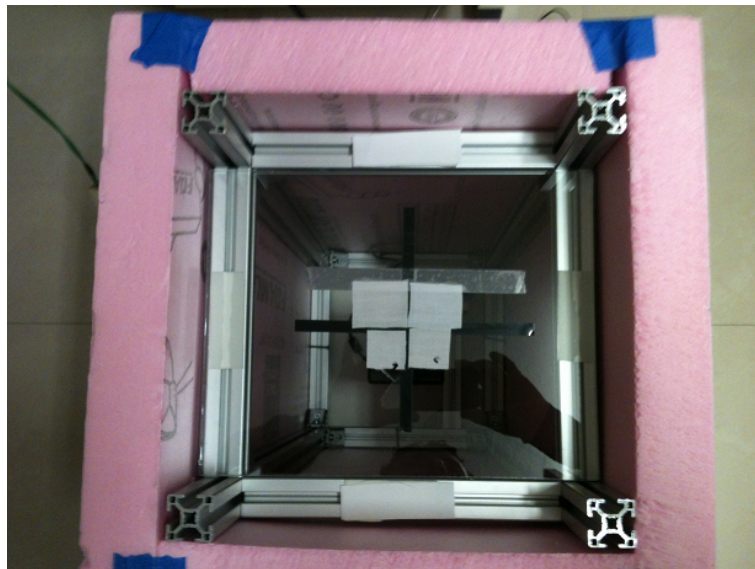


Figura 3.10: Fotografía en la que se puede apreciar la colocación de cuatro muestras textiles en los cuadrantes de las imágenes digitales

ción, sin embargo, el valor es consistente, por lo que se propone llevar a cabo un estudio estadístico de la coloración en toda la muestra con la finalidad de obtener un parámetro que permita evaluar y comparar la blancura de las muestras.

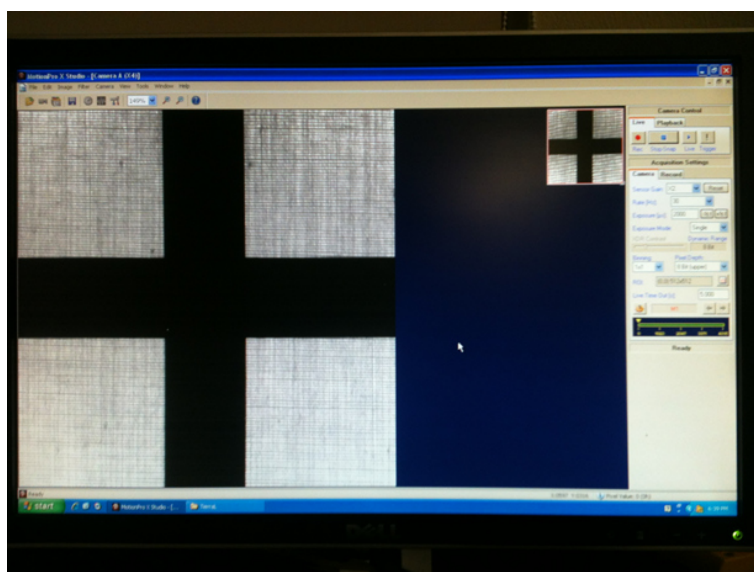


Figura 3.11: Pantalla que muestra las imágenes digitales de una muestra de color blanco y limpia

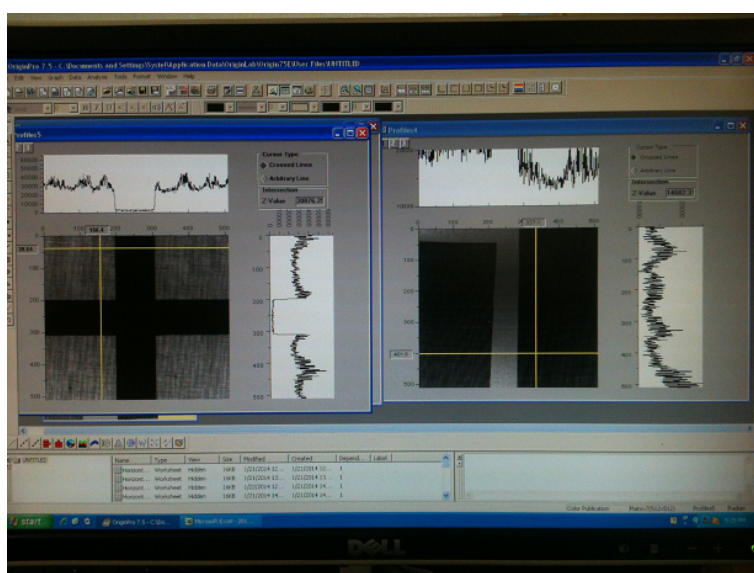


Figura 3.12: Pantalla que muestra los perfiles de coloración a lo largo de los cuadrantes de las imágenes digitales de una muestra de color blanco y limpia

Capítulo 4

Análisis de imágenes

4.1. La visión

Es conocida como uno de los principales procesos de adquisición de información utilizado por el ser humano para realizar el proceso de percepción. Remarcamos el aspecto de que visión es un proceso, ya que la definición que tratamos de abarcar no es la de captar solo una imagen sino la de llegar a percibir e interpretar lo que se ve lo cual implica además de un proceso fisiológico, un proceso cognitivo incluso hasta cultural. Es decir si mostramos una imagen a una persona lo que verá la persona no solo depende de lo que es captado como energía luminosa sino que intervienen además procesos deductivos e interpretativos de acuerdo al conocimiento y cultura de la persona. Respecto al proceso de la percepción se puede decir que es la interpretación de estímulos percibidos por los sentidos humanos que representan el ambiente en que se encuentra una persona.

Al ser la visión un proceso que le permite a una persona obtener una gran cantidad de información del entorno la cual a su vez le permitirá a la persona poder desenvolverse y realizar actividades en su ambiente, llega a ser un área de gran interés como objeto de investigación, cuyo objetivo es tratar de desarrollar máquinas que en cierto grado imiten el comportamiento de una persona. De aquí entonces podemos tratar de derivar una definición de *visión* por computadora. Indicamos una, ya que generalmente dependiendo del área en donde se trabaja se tiende a dar la definición. Tratando de no excluir alguna línea de investigación sobre *visión* por computadora diremos que es todo trabajo enfocado a generar conocimiento, y desarrollar algoritmos para tratar de lograr que una máquina simule en cierto grado el proceso de visión de una persona.

4.1.1. Sistema visual humano:

Anteriormente se pensaba que la única función del ojo humano era la de proporcionar al cerebro una copia o modelo del mundo exterior. Si bien el ojo humano genera una transformación de energía luminosa a impulsos que alimentan la corteza visual en el cerebro, el ojo también realiza un procesamiento de la imagen que adquiere, ya que los receptores en la retina en la parte posterior del ojo no están distribuidos uniformemente ni son sensitivos al mismo tipo de información óptica. Algunos receptores son mas sensitivos al movimiento, color o intensidad. Aún más, estos receptores se encuentran interconectados de manera que cuando un receptor recibe información altera el comportamiento de los receptores vecinos. Con este comportamiento se tiene que la imagen captada sufre ya un procesamiento aún antes de salir del ojo y dirigirse a la corteza visual. Además, una vez transmitida a la corteza cerebral, el ojo recibe retroalimentación para continuar el proceso de percepción visual. Esta retroalimentación altera la respuesta de los receptores y permite llevar a cabo la función que desempeña la fovea.

Con base en lo anterior podemos decir que el ojo humano forma parte del proceso de visión, el cual es un proceso que convierte la información sensorial visual en conocimiento de forma, identidad, o configuración de objetos en el ambiente. La visión es un proceso creativo, más que mecánico, en el cual podemos diferenciar entre ver y percibir. Ver es el registro físico del patrón de energía de la luz recibida del mundo que nos rodea. Percepción es la interpretación de lo que vemos.

4.1.2. Modelo de visión por computadora

Un modelo para realizar visión mediante una computadora define los niveles y procesos que se realizan sobre una escena para llegar a su interpretación.

El modelo se puede dividir en el procesamiento de nivel bajo, nivel intermedio y nivel alto. En el nivel bajo encontramos acciones sobre la imagen correspondiente a suavizado, umbralización, eliminación de ruido, definición de bordes, análisis de textura, etc. En el nivel intermedio en cambio tenemos acciones como definición de límites, regiones, superficies, que están relacionadas para generar objetos presentes en la imagen. Por último en el nivel alto se entablarán relaciones entre objetos para realizar la interpretación o descripción de la escena.

4.1.3. Definición de imagen digital

Los trabajos relacionados al PDI están relacionados al objeto imagen digital. Consideraremos que una imagen digital es la representación de una escena del mundo físico mediante el proceso de muestreo y transformación del dominio continuo al discreto. Esta transformación permitirá la utilización de máquinas discretas sobre la representación de una escena del mundo físico.

4.2. Digitalización de imágenes

Para poder realizar el procesamiento digital de imágenes se requiere de la captura de imágenes digitales. El proceso de captura se realiza mediante un digitalizador. Este dispositivo realiza lo que en el área de procesamiento digital de señales se conoce como conversión analógica-digital, el cual se compone de muestreo, cuantificación y codificación. El digitalizador generará una imagen digital la cual es una representación discreta de una imagen continua. Este proceso da lugar a la definición de pixel, el cual corresponde al elemento básico que compone a una imagen digital y corresponde a una de las muestras del proceso de digitalización.

Para la definición formal de imagen digital consideremos una imagen como una función de intensidad de luz bidimensional denotada por $I(x, y)$, donde el valor o la amplitud de la función en las coordenadas espaciales (x, y) es la intensidad ó brillo de esa imagen en ese punto. Para el caso de una imagen en tonos de gris la intensidad en las coordenadas (x, y) se denomina nivel de gris I .

Si consideramos (x, y) como puntos en un plano continuo estaríamos hablando de una imagen continua, pero considerando el dispositivo digitalizador tenderemos a (x, y) discretas, generando una función discreta. Así, si $I(x, y)$ representa una imagen digital tenemos que $i \in I(x, y)$ representa a un pixel y la imagen digital se puede representar también mediante una notación matricial.

$$I(x, y) = \begin{pmatrix} I(0, 0) & I(0, 1) & \cdots & I(0, M-1) \\ I(1, 0) & I(1, 1) & \cdots & I(1, M-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I(N-1, 0) & I(N-1, 1) & \cdots & I(N-1, M-1) \end{pmatrix}$$

La luz es un tipo de energía por lo que $I(x, y)$ debe cumplir con

$$0 < I(x, y) < \infty \quad (4.1)$$

En el área de procesamiento digital de imágenes es común referirse a la imagen en términos de sus valores de intensidad únicamente, sin embargo, la composición completa de la imagen está dada por

$$I(x, y) = l(x, y)r(x, y) \quad (4.2)$$

donde $l(x, y)$ representa la cantidad de luz incidente sobre la escena, *iluminación*, y $r(x, y)$ la cantidad de luz reflejada por el objeto en la escena, *reflectancia* y donde

$$0 < l(x, y) < \infty \quad y \quad 0 < r(x, y) < 1 \quad (4.3)$$

4.3. Adquisición de imagen

La electrónica comúnmente utilizada para la adquisición de imágenes es un dispositivo fotosensible, sensor CCD, del inglés charge-coupled device, y una tarjeta digitalizadora. EL CCD es un dispositivo físico sensible a una banda en el espectro de energía electromagnética y que produce una señal eléctrica de salida proporcional al nivel de energía sensada. El CCD convierte la energía luminosa en una señal eléctrica la cual es digitalizada por la tarjeta digitalizadora.

El CCD se encuentra en las cámaras de visión, la cual genera una señal analógica de video. La tarjeta digitalizadora se conecta en las ranuras de expansión de la computadora. En la actualidad existen cámaras digitales las cuales incluyen la tarjeta digitalizadora en la misma cámara y su salida es una señal digital. Las cámaras más modernas denominadas cámaras inteligentes, además de la tarjeta digitalizadora incorporan también un procesador de imágenes.

4.4. Muestreo y cuantificación:

El procesamiento digital de imágenes se realiza sobre una imagen que ha sido muestreada y cuantificada, es decir digitalizada. La digitalización de la imagen se realiza tanto en amplitud como espacialmente. Cabe mencionar que en el procesamiento digital de

señales muchas de las señales tratadas son función del tiempo, es decir la señal varía con respecto al tiempo. En cambio en una imagen el valor de la función, $I(x, y)$, cambia con respecto a la posición, o al espacio definido por la imagen.

A la digitalización de coordenadas espaciales (x,y) se le denomina muestreo de imagen y a la digitalización de amplitud se le denomina cuantificación de nivel de gris.

4.5. Procesamiento de histograma:

El histograma básicamente es la función obtenida de una imagen que nos indica la frecuencia de ocurrencia de los tonos de grises presentes en la imagen. Aunque es una función sencilla de calcular, proporciona información importante como por ejemplo: contraste y brillo de la imagen, información para la segmentación por umbrales de objetos presentes en la imagen, estadísticas de la imagen, etc.

4.6. Definición de histograma:

El histograma de niveles de grises de una imagen digital es una función discreta, debido a la naturaleza propia de la imagen digital, que indica, para cada nivel de gris, el número de pixeles presentes en la imagen.

$$i(l_k) = |\{i(x, y) : i(x, y) = l_k\}| \quad k = 0, \dots, L - 1 \quad (4.4)$$

donde l_k es el késimo nivel de gris y $\{ \}$ a indica cardinalidad del conjunto.

Si consideramos N como el número total de pixeles en la imagen y calculamos

$$i(l_k) = \frac{N_k}{N} \quad (4.5)$$

donde N_k representa el número de pixeles con tono de gris l_k entonces $i(l_k)$ es una estimación de la probabilidad de ocurrencia del nivel de grises l_k . Este enfoque es referente a considerar a una imagen como una señal aleatoria dado el comportamiento aleatorio del valor de los pixeles.

El histograma, $i(l_k)$, es único para cualquier imagen pero lo contrario no es verdad. Cada imagen tiene solo un histograma, sin embargo pueden existir dos o mas imágenes que tengan un mismo histograma.

El histograma de una imagen proporciona una descripción local de la apariencia de una imagen.

La suciedad de las muestras se determina cuantitativamente mediante análisis de imagen. Las muestras fotografiadas se analizan comparando condiciones de iluminación, muestra sin suciedad y muestra con suciedad sin lavar.

Cuatro muestras sin suciedad se fotografían en un arreglo especialmente diseñado para garantizar la repetibilidad de resultados. En cada cuadrante de la imagen se analiza la desviación respecto a la imagen de referencia ubicado como el cuadrante Norte-Oeste, ello consiste en restar a la imagen en cuestión la imagen del cuadrante Norte-Oeste. Un promedio se obtiene para cada muestra, el cual es el resultado de la suma de las imágenes captadas y dividir entre el número de imágenes que se han considerado, que en este caso son 10. El resultado es la corrección que debe realizarse en cada cuadrante por diferencias en la iluminación. La obtención del promedio obedece al filtrado de los errores producidos por variación de la iluminación.

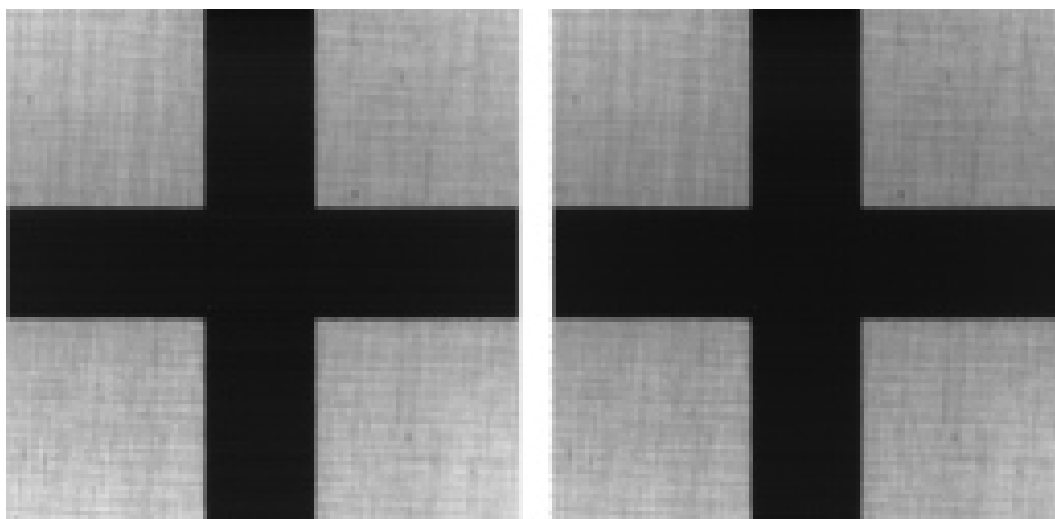


Figura 4.1: Imágenes de una muestra sin suciedad. *Izquierda* imagen original. *Derecha* imagen promedio.

Con una imagen promedio se procede al análisis de cada muestra. Las zonas de interés se dividen en zona de calibración (cuadrante Norte-Oeste), cuadrante de calibración sin lavado (Norte-Este) y zonas de análisis en los cuadrantes inferiores. La imagen promedio es dividida en cuatro porciones de 190×190 píxeles, una imagen por cada cuadrante.

De la muestra de cada cuadrante se obtienen parámetros estadísticos como valor medio, que es la intensidad de luz promedio en la matriz de píxeles; desviación estándar,

que es un parámetro de la variación del nivel de luz en la muestra; y el histograma, que relaciona la frecuencia con la cual aparece un tono de gris en la imagen de muestra.

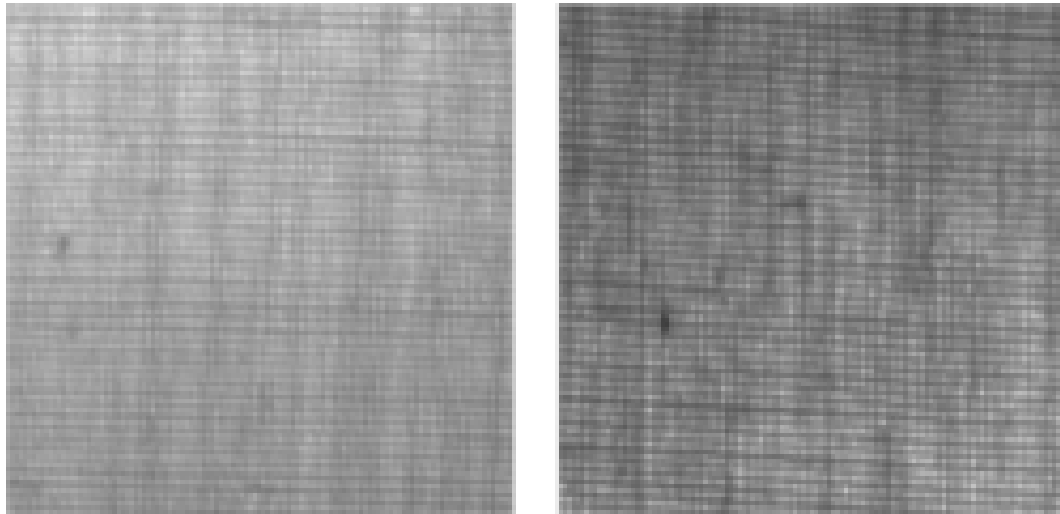


Figura 4.2: Imágenes extraídas a partir de la adquisición de imágenes. *Izquierda:* Muestra limpia. *Derecha:* Muestra con mancha de vino.

Los efectos de la textura y defectos de la muestra como son orificios o puntos oscuros son tratados de manera estadística a partir de todas las imágenes disponibles *que son 350*. Una muestra de tela limpia y una muestra con mancha de vino se muestran en la figura 4.2. La imagen no presenta grandes diferencias excepto por un brillo y algunas fallas en la muestra debido a defectos de la tela. La figura 4.3 muestra el histograma de las imágenes de la figura 4.2. Con línea roja se presenta el histograma para la muestra de vino y la línea azul corresponde al histograma de la muestra limpia. Se observa que la falta de iluminación en la imagen se percibe como un desplazamiento del histograma hacia la izquierda denotando reducción en la intensidad de la luz que pasa a través de la muestra. El valor medio y la desviación estándar para la muestra de mancha de vino son 126.44 y 25.98, respectivamente, mientras que para la muestra limpia el valor promedio es de 163.87 y la desviación estándar es 20.34.

El histograma con una forma Gaussiana con una desviación estándar reducida puede entenderse como una muestra limpia, mientras que una mayor dispersión en el histograma, una reducción del valor promedio y una distribución multinomial se entendería como una muestra sucia. La figura 4.4 muestra el histograma que resulta de restar las imágenes, en donde la línea color verde representa la resta de la imagen de la muestra con vino sin

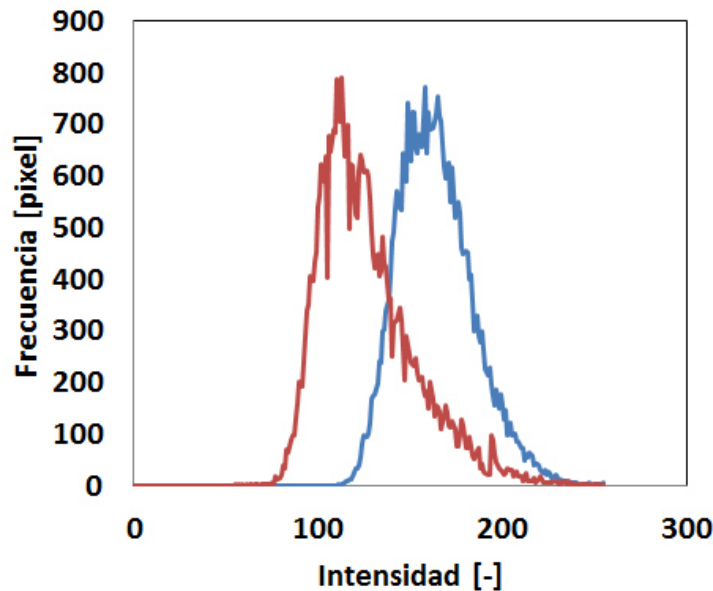


Figura 4.3: En la imagen la línea roja representa el histograma para la muestra de vino y la línea azul representa el histograma para la muestra limpia.

lavar y la imagen sin suciedad, la línea roja representa el histograma de la resta de las imágenes de la muestra M15 (vino sin lavar) y la muestra sin suciedad, mientras que la línea azul muestra el histograma de la resta de las imágenes de la muestra M15 (vino sin lavar) y la muestra sin suciedad. Es importante notar que en este gráfico se ha empleado escala logarítmica en el eje horizontal. La figura 4.3 indica que la muestra M15 obtuvo una mejor respuesta al lavado que la muestra M5 ya que permite el paso de una mayor cantidad de luz proveniente de la fuente luminosa, no así la imagen de referencia (color verde) que presenta menor intensidad luminosa.

Cuando se analiza la mancha de café, muestras M34 y M39, se observa que la diferencia entre imágenes respecto a la muestra sin mancha responde muy bien al proceso de lavado y las diferencias entre ellas no son significativas. Las líneas roja y azul en la figura 4.5 muestran el histograma de la diferencia entre imágenes de las muestras M34 y M39 respecto a la muestra sin suciedad. Se observa que la muestra sin lavar es más oscura que las muestras lavadas, ello indica que el café es removido satisfactoriamente en ambos procesos de lavado.

Existen dos métodos disponibles para analizar los resultados. El primero de ellos con-

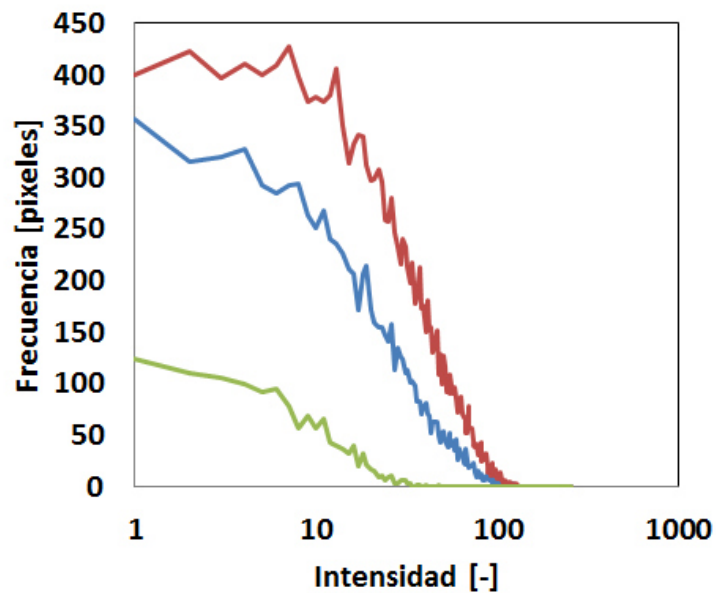


Figura 4.4: Histograma para muestras con manchas de vino M5 (azul) y M15 (rojo). La línea de color verde muestra el histograma de la muestra con mancha de vino sin lavar

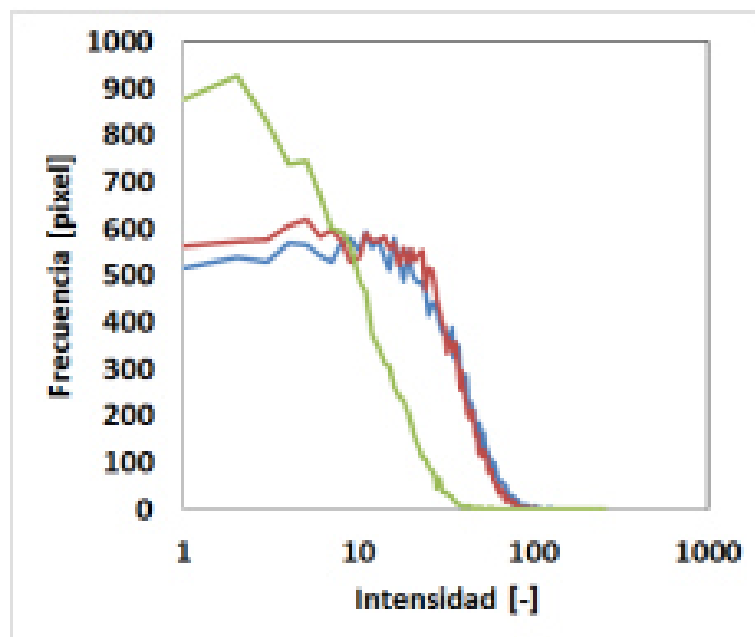


Figura 4.5: Histograma para muestras con manchas de café M34 (azul) y M39 (rojo). La línea de color verde muestra el histograma de la muestra con mancha de café sin lavar

siste en una comparación directa entre los histogramas de las muestras a evaluar con el histograma de la muestra de referencia, que a saber es una muestra con el mismo tipo de mancha pero que no ha sido lavado. Este método es sencillo y rápido, aunque puede estar sujeto a errores debido a la iluminación y a defectos en la imagen como fibras en mal estado, orificios o manchas en la muestra.

El método utilizado consiste en comparar las diferencias entre imágenes antes y después del proceso de lavado. Este método resulta más preciso, pero es altamente dependiente de la calidad de iluminación, la cual es sumamente difícil de controlar con precisión, además como las imágenes fueron captadas con una cámara de alta velocidad, la iluminación presenta fluctuaciones debido a la frecuencia de la alimentación eléctrica.

La figura 4.6 muestra los histogramas obtenidos a partir de muestras manchadas con vino sin lavar, la muestra manchada de vino que ha sido lavada y la muestra sin lavar y sin suciedad alguna. Se observa que la muestra sin lavar tiene un menor nivel de gris en general, lo que indica que el paso de luz a través de la muestra es más difícil, en cambio, la muestra *sin lavar y sin suciedad* posee un mayor nivel de gris, indicando que existe una mayor facilidad para el paso de luz a través de las fibras. Un proceso ideal de lavado restauraría la capacidad del paso de luz a través de la muestra, lo que produciría el corrimiento del histograma hacia la derecha, acercándose al histograma que corresponde a la muestra blanca. A manera de ejemplo, la muestra M30 respondió mejor al lavado en comparación con la M25 lo que queda de manifiesto por el hecho de que el histograma de la muestra M30 se recorrió hacia la derecha de manera más evidente.

Para poder llevar a cabo una comparación cuantitativa de la efectividad de los proceso de lavado de tal forma que sea factible una comparación directa, se requiere de un parámetro que sea susceptible de ser cuantificado de forma consistente y precisa. Se propone un **Coefficiente de Limpieza**, μ de la siguiente forma:

$$\mu = 1 - \frac{(M_i - M_B)}{(M_{Smax} - M_B)} \quad (4.6)$$

donde M de la media estadística de la intensidad en un intervalo de confianza del 95 % en el histograma de la muestra en particular. En otras palabras, se desechan el 5 % de los valores de intensidad con mayor variabilidad y se aplica una media estadística para definir un valor característico de la intensidad luminosa de cada muestra. Los subíndices

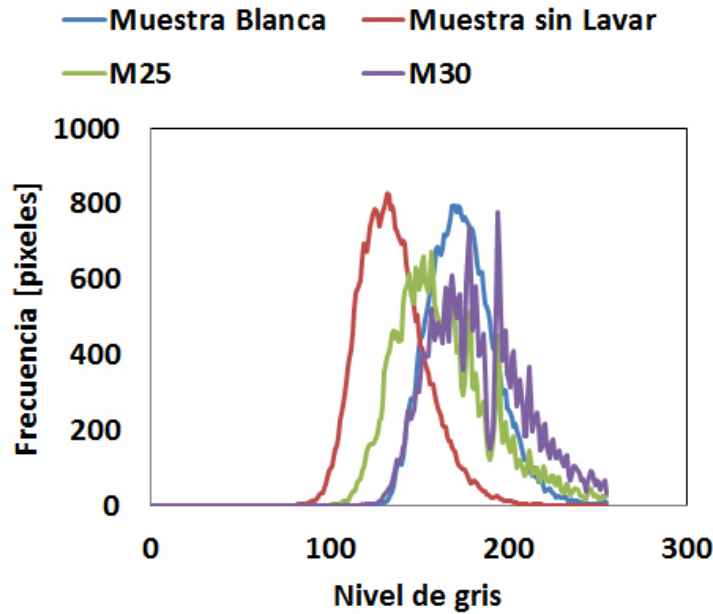


Figura 4.6: Histogramas comparativos que ilustran cualitativamente la efectividad del lavado.

i , B , S_{max} indican muestra i -ésima, muestra de referencia (sin lavar y sin suciedad) y muestra con mancha sin lavar. En particular $M_{S_{max}}$ se calcula como la media estadística de los valores M para cada uno de los tipos de mancha.

La figura 4.7 muestra los resultados preliminares del *coeficiente de limpieza* para todas las muestras con manchas de vino que han sido lavadas bajo diferentes estrategias. Los marcadores diamante (en azul) corresponden al *coeficiente de Limpieza* de la muestra sin lavar. Se observa que la variación es del orden del 3 %, indicando con ello la forma en la que se ha definido dicho coeficiente es consistente y confiable. Los marcadores cuadrados (en rojo) corresponden al coeficiente de limpieza obtenidos para las distintas muestras manchadas de vino, una vez que han sido lavadas. Es notable que en algunos casos el factor de limpieza es mayor a 1.0, indicando con ello que esa muestra en particular ha superado en limpieza a la muestra de referencia (sin lavar y sin mancha), lo que indicaría que la muestra de referencia podría contener cierta suciedad producto de almacenamiento, manipulación, etc., misma que es removida en el proceso de lavado.

La figura 4.8 muestra el coeficiente de limpieza para muestras manchadas con tierra. Se observa que existe menos variabilidad en el coeficiente de limpieza denotando con ello que la efectividad de la remoción de este tipo de mancha es menos dependiente de

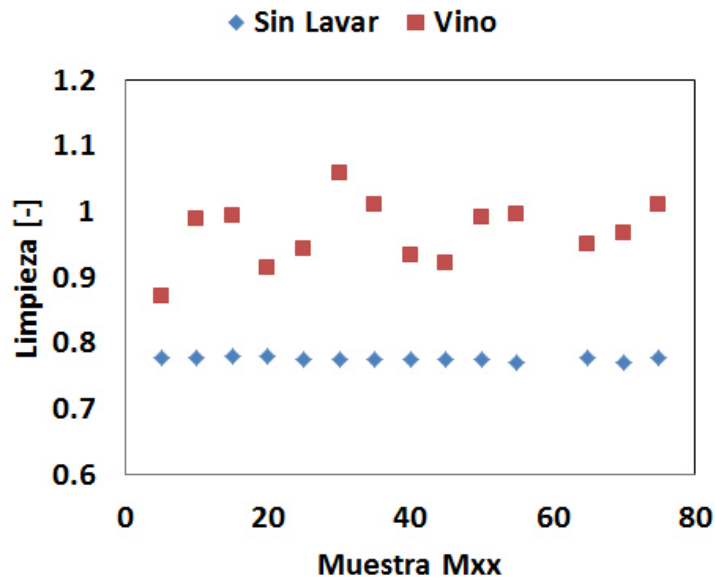


Figura 4.7: Coeficiente de limpieza para muestras manchadas con vino una vez que han sido lavadas y las muestras sin lavar con el mismo tipo de mancha

las condiciones del proceso de lavado, situación que no ocurre para las manchas de vino en las que evidentemente la efectividad de la remoción es altamente dependiente de las condiciones de lavado, ver figura 4.7.

La figura 4.9 muestra que el tipo de mancha identificado como tierra lavada (Tierra L) se remueve de manera efectiva consiguiendo limpieza superiores en todos los casos a las muestras de referencia. No obstante lo anterior, es importante notar que en este caso los resultados muestran una alta dependencia en las condiciones de lavado. La amplia dispersión de los marcadores de cuadro (rojo) en la figura 4.9 denotan una alta dependencia del coeficiente de limpieza en las condiciones de lavado.

La figura 4.10 muestra que la efectividad en la remoción de manchas de café es altamente dependiente de las características del proceso de lavado. En esta gráfica sugiere que bajo cualquiera de las estrategias de lavado que se emplearon en este estudio, este tipo de mancha se remueve de manera efectiva. Sin embargo, es importante notar que el coeficiente de limpieza está referido a una muestra sin mancha y sin lavar por lo que en caso de que esta muestra de referencia contenga una cierta cantidad de suciedad, una vez que la muestra sea lavada podría alcanzar niveles de limpieza superiores a la condición original. Es presumible que si la muestra de referencia fuera lavada previo al análisis, no existiría

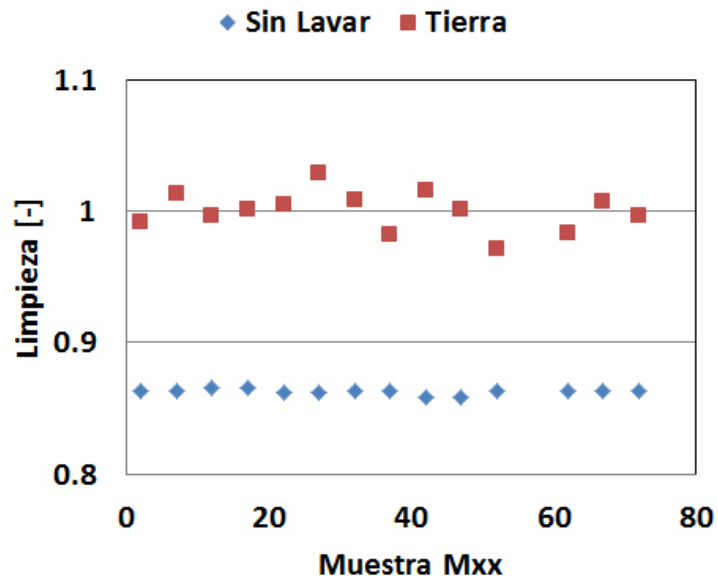


Figura 4.8: Coeficiente de limpieza para muestras manchadas con tierra una vez que han sido lavadas y las muestras sin lavar con el mismo tipo de mancha

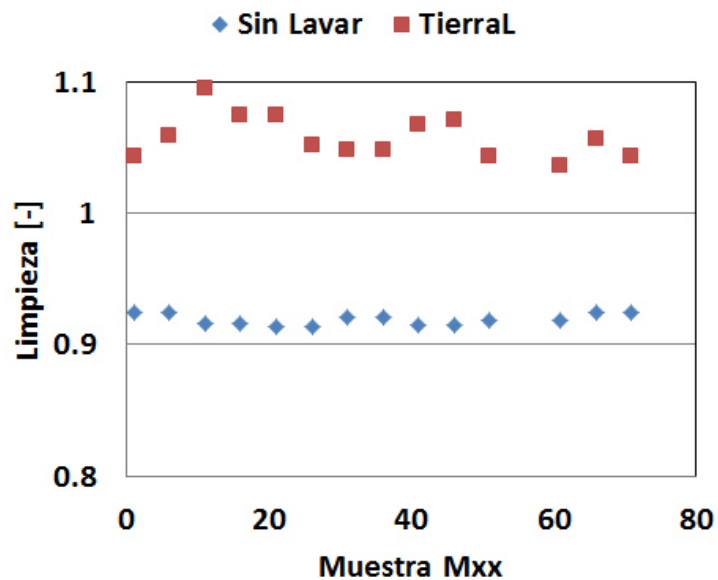


Figura 4.9: Coeficiente de limpieza para muestras manchadas con tierra lavada una vez que han sido lavadas y las muestras sin lavar con el mismo tipo de mancha

la posibilidad de alcanzar valores iguales o superiores a 1 en el coeficiente de limpieza.

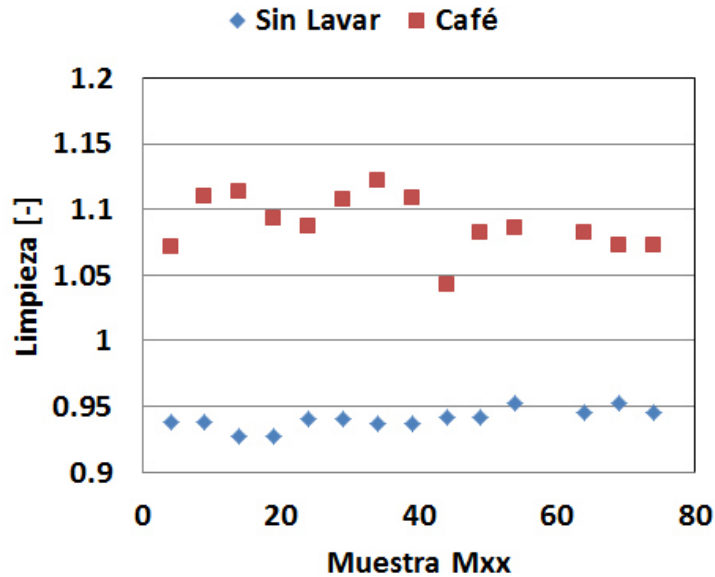


Figura 4.10: Coeficiente de limpieza para muestras manchadas con café una vez que han sido lavadas y las muestras sin lavar con el mismo tipo de mancha

La figura 4.11 muestra que existe una dependencia pequeña de la efectividad de la remoción de las manchas de Café Lavado con la estrategia de lavado. Los coeficientes de limpieza muestran que este tipo de mancha se remueve de manera efectiva independientemente del proceso de lavado. Nuevamente el Coeficiente de Limpieza resulta muy alto en todos los casos, situación semejante al caso de la mancha de Café.

Con los resultados antes presentados resulta inadecuado realizar una comparación directa en términos de la efectividad de la estrategia de lavado por lo que es necesario redefinir el coeficiente de limpieza. Se propone entonces que para cada tipo de mancha los coeficientes de limpieza sea referidos a los valores máximo y mínimo de dicho coeficiente para el tipo de mancha en particular. De este modo el coeficiente de limpieza queda escalado obteniéndose así valores entre 0 y 1, donde cero indica la mínima limpieza obtenida y uno la mejor. La figura 4.12 muestra los resultados finales del coeficiente de limpieza normalizado para todos los tipos de mancha y todos los tipos de lavado empleadas.

En la figura 4.12 se observa una importante dispersión en el Coeficiente de Limpieza Normalizado, sin embargo es posible notar que la mayoría de los resultados está centrada en el valor 0.62, lo que indica que la manera en la que se ha definido el Coeficiente de

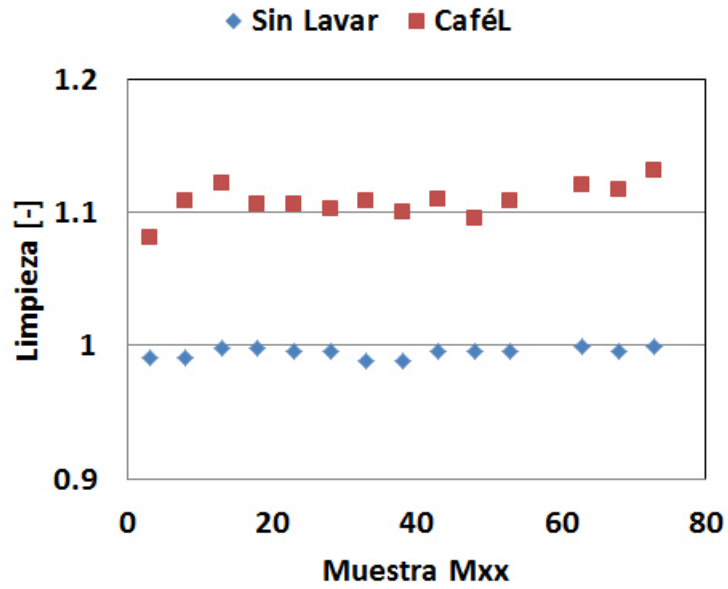


Figura 4.11: Coeficiente de limpieza para muestras manchadas con café lavado una vez que han sido lavadas y las muestras sin lavar con el mismo tipo de mancha

Limpieza Normalizado es conveniente y adecuado la las metodologías empleadas en este estudio experimental de la remoción de la suciedad.

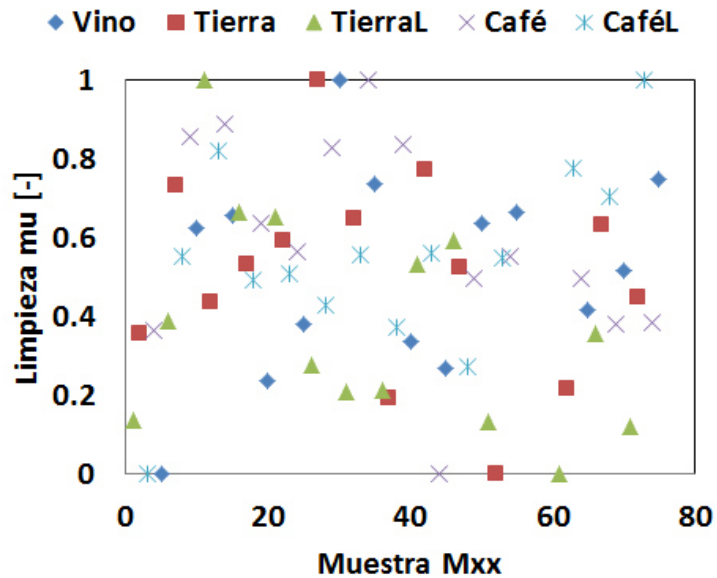


Figura 4.12: Coeficiente de limpieza normalizado para la totalidad de muestras analizadas en este estudio

Capítulo 5

Evaluación de los beneficios en términos de los ahorros de energía y agua

5.1. Diseño de experimentos

Se definieron tres agentes para el ensuciamiento, tierra, café y vino tinto. Se definieron dos niveles de ensuciamiento con base a la concentración de agentes seleccionados (bajo y alto) de tal forma que resultan niveles típicos a los que se somete una prenda de ropa real. Los tipos de ensuciamiento analizados son:

1. Ensuciamiento ligero con tierra identificado como *Tierra Lavado*
2. Ensuciamiento con tierra, *Tierra*
3. Ensuciamiento ligero con café, *Café Lavado*
4. Ensuciamiento con café, *Café*
5. Ensuciamiento con vino, *Vino*

Se trabajó en la definición de los ciclos de lavado, donde se incluye la variación del tiempo del ciclo (8 o 10 minutos), el efecto de la temperatura del agua de lavado (25 °C o 50 °C), y la variación de los niveles de agitación (regular y baja).

El diseño de experimentos que se preparó y ejecutó para este estudio se muestra en las figuras 5.1 y 5.2.

MUESTRA	MANCHA	CICLO (MIN)	AGITACIÓN	T(°C)	DETERGENTE
1	TIERRA LAVADO	10	ALTA	25	A
2	TIERRA	10	ALTA	25	A
3	CAFÉ LAVADO	10	ALTA	25	A
4	CAFÉ	10	ALTA	25	A
5	VINO TINTO	10	ALTA	25	A
6	TIERRA LAVADO	10	BAJA	25	A
7	TIERRA	10	BAJA	25	A
8	CAFÉ LAVADO	10	BAJA	25	A
9	CAFÉ	10	BAJA	25	A
10	VINO TINTO	10	BAJA	25	A
11	TIERRA LAVADO	8	ALTA	25	A
12	TIERRA	8	ALTA	25	A
13	CAFÉ LAVADO	8	ALTA	25	A
14	CAFÉ	8	ALTA	25	A
15	VINO TINTO	8	ALTA	25	A
16	TIERRA LAVADO	8	BAJA	25	A
17	TIERRA	8	BAJA	25	A
18	CAFÉ LAVADO	8	BAJA	25	A
19	CAFÉ	8	BAJA	25	A
20	VINO TINTO	8	BAJA	25	A
21	TIERRA LAVADO	10	ALTA	25	B
22	TIERRA	10	ALTA	25	B
23	CAFÉ LAVADO	10	ALTA	25	B
24	CAFÉ	10	ALTA	25	B
25	VINO TINTO	10	ALTA	25	B
26	TIERRA LAVADO	10	BAJA	25	B
27	TIERRA	10	BAJA	25	B
28	CAFÉ LAVADO	10	BAJA	25	B
29	CAFÉ	10	BAJA	25	B
30	VINO TINTO	10	BAJA	25	B
31	TIERRA LAVADO	8	ALTA	25	B
32	TIERRA	8	ALTA	25	B
33	CAFÉ LAVADO	8	ALTA	25	B
34	CAFÉ	8	ALTA	25	B
35	VINO TINTO	8	ALTA	25	B
36	TIERRA LAVADO	8	BAJA	25	B
37	TIERRA	8	BAJA	25	B
38	CAFÉ LAVADO	8	BAJA	25	B
39	CAFÉ	8	BAJA	25	B
40	VINO TINTO	8	BAJA	25	B

Figura 5.1: Diseño de experimentos diseñado para los procesos de lavado

5.2. Pruebas físicas de lavado de muestras textiles

Se llevaron a cabo las pruebas físicas de lavado de muestras textiles tomando como base el diseño de experimentos con las variables antes mencionadas. El diseño de ex-

MUESTRA	MANCHA	CICLO (MIN)	AGITACIÓN	T(°C)	DETERGENTE
41	TIERRA LAVADO	10	ALTA	50	B
42	TIERRA	10	ALTA	50	B
43	CAFÉ LAVADO	10	ALTA	50	B
44	CAFÉ	10	ALTA	50	B
45	VINO TINTO	10	ALTA	50	B
46	TIERRA LAVADO	10	BAJA	50	B
47	TIERRA	10	BAJA	50	B
48	CAFÉ LAVADO	10	BAJA	50	B
49	CAFÉ	10	BAJA	50	B
50	VINO TINTO	10	BAJA	50	B
51	TIERRA LAVADO	8	ALTA	50	B
52	TIERRA	8	ALTA	50	B
53	CAFÉ LAVADO	8	ALTA	50	B
54	CAFÉ	8	ALTA	50	B
55	VINO TINTO	8	ALTA	50	B
56	TIERRA LAVADO	8	ALTA	50	A
57	TIERRA	8	ALTA	50	A
58	CAFÉ LAVADO	8	ALTA	50	A
59	CAFÉ	8	ALTA	50	A
60	VINO TINTO	8	ALTA	50	A
61	TIERRA LAVADO	8	BAJA	50	B
62	TIERRA	8	BAJA	50	B
63	CAFÉ LAVADO	8	BAJA	50	B
64	CAFÉ	8	BAJA	50	B
65	VINO TINTO	8	BAJA	50	B
66	TIERRA LAVADO	10	ALTA	50	A
67	TIERRA	10	ALTA	50	A
68	CAFÉ LAVADO	10	ALTA	50	A
69	CAFÉ	10	ALTA	50	A
70	VINO TINTO	10	ALTA	50	A
71	TIERRA LAVADO	10	BAJA	50	A
72	TIERRA	10	BAJA	50	A
73	CAFÉ LAVADO	10	BAJA	50	A
74	CAFÉ	10	BAJA	50	A
75	VINO TINTO	10	BAJA	50	A
76	TIERRA LAVADO	8	BAJA	50	A
77	TIERRA	8	BAJA	50	A
78	CAFÉ LAVADO	8	BAJA	50	A
79	CAFÉ	8	BAJA	50	A
80	VINO TINTO	8	BAJA	50	A

Figura 5.2: Diseño de experimentos diseñado para los procesos de lavado. *Continuación*

perimentos que se ha mencionado entonces incluye al menos 40 condiciones distintas. Adicionalmente, es importante mencionar que se corrieron las pruebas un par de veces para comparar de forma objetiva el detergente *A* contra el detergente *B*, por lo que se trata

de al menos 80 muestras en total.

Para identificar de forma práctica la estrategia de lavado empleada para cada una de las muestras, se propone un código de identificación, mismo que se muestra en la figura 5.3. El código consiste en la combinación de cinco dígitos que identifican la estrategia de lavado con detalles en el orden siguiente: Tipo de Mancha-Duración del Ciclo-Nivel de Agitación-Temperatura-Tipo de Detergente.

MANCHA	CICLO	AGITACIÓN	TEMPERATURA	DETERGENTE
1 Tierra lavado	1 Corto	1 Baja	1 Fría	1 A
2 Tierra	2 Largo	2 Alta	2 Caliente	2 B
3 Café lavada				
4 Café				
5 Vino tinto				

Figura 5.3: Codificación para identificación de muestras

Por ejemplo la muestra que se identifica como 52211 corresponde a una muestra manchada con vino tinto, lavada durante 10 minutos, con agitación regular, temperatura de 25 °C y empleando el detergente A.

5.3. Cálculo de la energía

Para llevar a cabo el cálculo de la energía consumida durante el proceso se hace uso de los datos técnicos disponibles en documentos de fabricantes de lavadoras comerciales industriales.

Adicionalmente, se tiene en consideración el ciclo de lavado especificado para el detergente A, de acuerdo al proceso propuesto que se muestra en la figura 5.4.

La energía consumida en el proceso de lavado de un kg de ropa, debida al consumo eléctrico se puede estimar de la siguiente forma:

$$E = \frac{\dot{W}_{e1} t_1 + \dot{W}_{e2} t_2}{m_r} \quad (5.1)$$

donde W_{e1} es la potencia eléctrica que consume cuando trabaja el sistema de agitación de la lavadora con una carga completa, W_{e2} es la potencia consumida cuando trabaja el

Proceso de lavado para el detergente A

Capacidad de Máquina	Grado de suciedad	Tipo de ropa	Clasificación de la dureza del agua Valores expresados en ppm.			
50 Ligera	Sábana		0 a 68	Agua blanda		
			68 a 136	Agua semi-dura		
			136 a 205	Agua dura		
			205 a 307	Agua muy dura		
			307 a 513	Agua bastante dura		

Operación	Tiempo			Consumo (litros)	Temp. (°C)	Productos	Dureza del agua (ppm)
	Minutos	Segundos	Nivel				
1 Enjuague	2		Alto	150	30	Detergente A	120
2 Lavado	12		Bajo	75	30	Detergente A	
3 Enjuague	2		Alto	150	30		
4 Enjuague	2		Alto	150	30		
5 Extracción	7						
Total	25			525			

Tiempo del proceso	Tiempo formula	Tiempo muerto	Tiempo Total
	25	10	35

Procedimiento		
HP/kW	Por tiempo	Costo total
5.73	35	3.34
\$2.00	3.34	\$6.69

Figura 5.4: Proceso propuesto para el detergente A

sistema de extracción de agua de la ropa de la lavadora, t_1 y t_2 son los tiempos en los que la lavadora opera con agitación y extracción, respectivamente, y m_r es la masa de la carga de ropa.

Para la evaluación se considera que la carga de ropa sería de 50 kg. De acuerdo a los datos del proceso para el detergente A se requieren 525 lt de agua. De acuerdo a los datos del fabricante los motores de la lavadora operan 18 minutos con una potencia de 2.1 kW (en proceso de agitación que incluye el lavado y los enjuagues) y 7 minutos con una potencia de 3.7 kW (proceso de extracción). Entonces, $W_{e1} = 2.1$ kW, $W_{e2} = 3.7$ kW, $t_1 = 1080$ s, $t_2 = 420$ s, y $m_r = 50$ kg. Entonces en un ciclo de lavado con carga completa utilizando esta lavadora se emplean 2354 kJ cuando se lavan 50 kg de ropa. Es decir que **se utilizan 47.1 kJ (0.013 kWh) de energía eléctrica por cada kg de ropa lavada, únicamente en el proceso de agitación.**

Por otra parte, si se considera que la temperatura del agua de la red que se emplea en el

lavado se encuentra a 25 °C y esta agua se calienta hasta 45 °C para el proceso de lavado con agua caliente, se requieren 83.6 kJ por cada kg de agua. Considerando que para la carga completa se utilizan 525 lt de agua para lavar 50 kg de ropa, entonces se utilizan 10.5 lt de agua por cada kg de ropa. De esta forma, **se requerirán 877.8 kJ (0.244 kWh) para calentar el agua necesaria para lavar un kg de ropa**, cuando ésta se desee lavar con agua caliente.

Para el cálculo de la energía cuando se emplea un ciclo con agitación baja se estima que el consumo de potencia eléctrica del motor es el 70 % del consumo con agitación regular es decir, para baja agitación el motor consume 1.47 kW.

Los datos anteriores se emplean para estimar la energía que se utilizaría por cada kg de ropa que se lave con las estrategias analizadas en este estudio, las mismas que se detallan en el diseño de experimentos de la figura 5.1.

Capítulo 6

Análisis de resultados

Se procedió entonces a la realización del Análisis de Resultados. Se midió el grado de limpieza de cada una de las muestras después del proceso de lavado descrito en el diseño de experimentos. Con la información obtenida de esta forma resultó posible realizar una ponderación de las ventajas del uso del detergente A. Particularmente, se estimó el ahorro que se puede lograr en el consumo de energía en ciclos de lavadoras comerciales como consecuencia de la reducción del tiempo del ciclo de lavado. También, se estimó el ahorro de energía debido al uso de agua fría en el lavado y se estimó el ahorro de agua que es posible obtener al utilizar el detergente **A** en comparación con el detergente **B**.

Las figuras 6.1 y 6.2 muestran los resultados cualitativos obtenidos a partir de la metodología desarrollada en este proyecto, las estrategias de lavado y la metodología de evaluación de limpieza. Se incluyen detalles como tipo de mancha, duración del ciclo de lavado, nivel de agitación, tipo de detergente y su correspondiente Coeficiente de Limpieza Normalizado.

La figura 6.3 muestra de forma comparativa el Coeficiente de Limpieza Normalizado que se obtiene después del lavado de las muestras con ensuciamiento de Tierra Lavada. Como se puede ver, la secuencia permite identificar que se han colocado en pares las metodologías de lavado que son iguales, difiriendo en el tipo de detergente. Así por ejemplo el primer par son las muestras 11111 y 11112, después le sigue la 11121 y la 11122, y así sucesivamente. Bajo este arreglo se puede ver que existen estrategias en las que uno y otro detergente resultan más efectivas que su competidor para la remoción de las manchas de Tierra Lavada. Las figuras 6.4, 6.5, 6.6 fueron creadas en el mismo orden de ideas y corresponden respectivamente a las muestras con ensuciamiento de Tierra, Café Lavado, Café y Vino. En todos los casos se puede ver que no existe una estrategia única que garan-

MUESTRA	MANCHA	CICLO (MIN)	AGITACIÓN	T(°C)	DETERGENTE	CODIGO	BLANCURA (%)	ENERGÍA (Kwh)
1	TIERRA LAVADO	10	ALTA	25	A	12211	0.580	0.0131
2	TIERRA	10	ALTA	25	A	22211	0.590	0.0131
3	CAFÉ LAVADO	10	ALTA	25	A	32211	0.240	0.0131
4	CAFÉ	10	ALTA	25	A	42211	0.520	0.0131
5	VINO TINTO	10	ALTA	25	A	52211	0.200	0.0131
6	TIERRA LAVADO	10	BAJA	25	A	12111	0.700	0.0092
7	TIERRA	10	BAJA	25	A	22111	0.830	0.0092
8	CAFÉ LAVADO	10	BAJA	25	A	32111	0.660	0.0092
9	CAFÉ	10	BAJA	25	A	42111	0.890	0.0092
10	VINO TINTO	10	BAJA	25	A	52111	0.700	0.0092
11	TIERRA LAVADO	8	ALTA	25	A	11211	1.000	0.0105
12	TIERRA	8	ALTA	25	A	21211	0.640	0.0131
13	CAFÉ LAVADO	8	ALTA	25	A	31211	0.860	0.0131
14	CAFÉ	8	ALTA	25	A	41211	0.920	0.0131
15	VINO TINTO	8	ALTA	25	A	51211	0.720	0.0131
16	TIERRA LAVADO	8	BAJA	25	A	11111	0.830	0.0073
17	TIERRA	8	BAJA	25	A	21111	0.700	0.0073
18	CAFÉ LAVADO	8	BAJA	25	A	31111	0.620	0.0073
19	CAFÉ	8	BAJA	25	A	41111	0.730	0.0073
20	VINO TINTO	8	BAJA	25	A	51111	0.390	0.0073
21	TIERRA LAVADO	10	ALTA	25	B	12212	0.830	0.0131
22	TIERRA	10	ALTA	25	B	22212	0.740	0.0131
23	CAFÉ LAVADO	10	ALTA	25	B	32212	0.630	0.0131
24	CAFÉ	10	ALTA	25	B	42212	0.670	0.0131
25	VINO TINTO	10	ALTA	25	B	52212	0.510	0.0131
26	TIERRA LAVADO	10	BAJA	25	B	12112	0.650	0.0092
27	TIERRA	10	BAJA	25	B	22112	1.000	0.0092
28	CAFÉ LAVADO	10	BAJA	25	B	32112	0.570	0.0092
29	CAFÉ	10	BAJA	25	B	42112	0.870	0.0092
30	VINO TINTO	10	BAJA	25	B	52112	1.000	0.0092
31	TIERRA LAVADO	8	ALTA	25	B	11212	0.610	0.0073
32	TIERRA	8	ALTA	25	B	21212	0.780	0.0073
33	CAFÉ LAVADO	8	ALTA	25	B	31212	0.660	0.0073
34	CAFÉ	8	ALTA	25	B	41212	1.000	0.0073
35	VINO TINTO	8	ALTA	25	B	51212	0.790	0.0073
36	TIERRA LAVADO	8	BAJA	25	B	11112	0.610	0.0073
37	TIERRA	8	BAJA	25	B	21112	0.480	0.0073
38	CAFÉ LAVADO	8	BAJA	25	B	31112	0.520	0.0073
39	CAFÉ	8	BAJA	25	B	41112	0.880	0.0073
40	VINO TINTO	8	BAJA	25	B	51112	0.470	0.0073

Figura 6.1: Coeficiente de Limpieza Normalizado en función de las características del lavado.

tice un mayor coeficiente de limpieza normalizado por lo que resulta necesario analizar con detalle los resultados para identificar las ventajas de uno y otro detergente.

La figura 6.8 muestra una comparación entre los coeficientes de limpieza normalizados cuando se usa la mínima y máxima cantidad de energía en el proceso de lavado, para los distintos tipos de ensuciamiento, empleando el detergente **A**. El mínimo de consumo de energía se obtiene utilizando un ciclo corto, con agitación baja y sin calentamiento de agua. El consumo máximo con los parámetros opuestos. Puede verse entonces que no necesariamente utilizar mucha energía conduce a mejores resultados en la limpieza. Esto es particularmente cierto en la remoción de tierra lavada y en café, condiciones en la que se requiere menor uso energía.

La figura 6.9 muestra una comparación entre los coeficientes de limpieza normalizados cuando se usa la mínima y máxima cantidad de energía en el proceso de lavado, para los distintos tipos de ensuciamiento, empleando el detergente **B**. Puede verse que para el

MUESTRA	MANCHA	CICLO (MIN)	AGITACIÓN	T(°C)	DETERGENTE	CODIGO	BLANCURA (%)	ENERGÍA (Kwh)
41	TIERRA LAVADO	10	ALTA	50	B	12222	0.770	0.2570
42	TIERRA	10	ALTA	50	B	22222	0.850	0.2570
43	CAFÉ LAVADO	10	ALTA	50	B	32222	0.670	0.2570
44	CAFÉ	10	ALTA	50	B	42222	0.250	0.2570
45	VINO TINTO	10	ALTA	50	B	52222	0.420	0.2570
46	TIERRA LAVADO	10	BAJA	50	B	12122	0.800	0.2531
47	TIERRA	10	BAJA	50	B	22122	0.700	0.2531
48	CAFÉ LAVADO	10	BAJA	50	B	32122	0.450	0.2531
49	CAFÉ	10	BAJA	50	B	42122	0.620	0.2531
50	VINO TINTO	10	BAJA	50	B	52122	0.710	0.2531
51	TIERRA LAVADO	8	ALTA	50	B	11222	0.570	0.2544
52	TIERRA	8	ALTA	50	B	21222	0.360	0.2544
53	CAFÉ LAVADO	8	ALTA	50	B	31222	0.660	0.2544
54	CAFÉ	8	ALTA	50	B	41222	0.660	0.2544
55	VINO TINTO	8	ALTA	50	B	51222	0.730	0.2544
56	TIERRA LAVADO	8	ALTA	50	A	11221	0.470	0.2544
57	TIERRA	8	ALTA	50	A	21221	0.730	0.2544
58	CAFÉ LAVADO	8	ALTA	50	A	31221	0.360	0.2544
59	CAFÉ	8	ALTA	50	A	41221	0.560	0.2544
60	VINO TINTO	8	ALTA	50	A	51221	0.940	0.2544
61	TIERRA LAVADO	8	BAJA	50	B	11122	0.510	0.2512
62	TIERRA	8	BAJA	50	B	21122	0.500	0.2512
63	CAFÉ LAVADO	8	BAJA	50	B	31122	0.830	0.2512
64	CAFÉ	8	BAJA	50	B	41122	0.620	0.2512
65	VINO TINTO	8	BAJA	50	B	51122	0.540	0.2512
66	TIERRA LAVADO	10	ALTA	50	A	12221	0.680	0.2570
67	TIERRA	10	ALTA	50	A	22221	0.760	0.2570
68	CAFÉ LAVADO	10	ALTA	50	A	32221	0.770	0.2570
69	CAFÉ	10	ALTA	50	A	42221	0.540	0.2570
70	VINO TINTO	10	ALTA	50	A	52221	0.610	0.2570
71	TIERRA LAVADO	10	BAJA	50	A	12121	0.570	0.2531
72	TIERRA	10	BAJA	50	A	22121	0.650	0.2531
73	CAFÉ LAVADO	10	BAJA	50	A	32121	1.000	0.2531
74	CAFÉ	10	BAJA	50	A	42121	0.540	0.2531
75	VINO TINTO	10	BAJA	50	A	52121	0.800	0.2531
76	TIERRA LAVADO	8	BAJA	50	A	11121	0.000	0.2512
77	TIERRA	8	BAJA	50	A	21121	0.000	0.2512
78	CAFÉ LAVADO	8	BAJA	50	A	31121	0.000	0.2512
79	CAFÉ	8	BAJA	50	A	41121	0.000	0.2512
80	VINO TINTO	8	BAJA	50	A	51121	0.000	0.2512

Figura 6.2: Coeficiente de Limpieza Normalizado en función de las características del lavado. *Continuación*

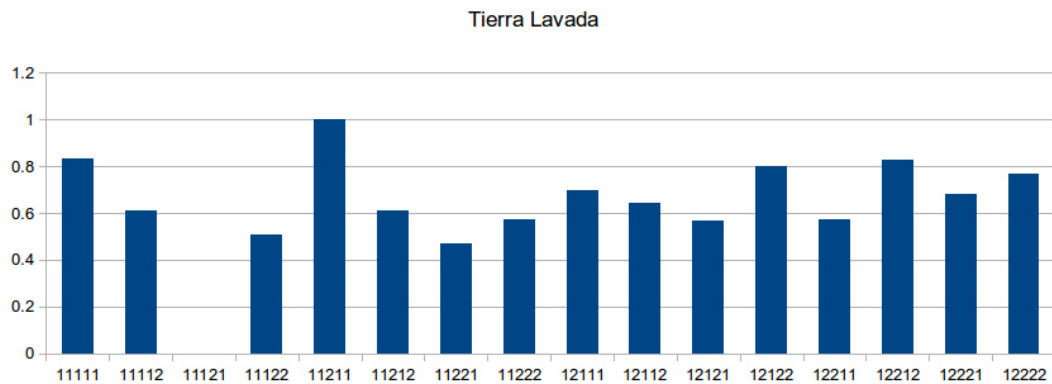


Figura 6.3: Comparativa del Coeficiente de Limpieza Normalizado para distintas estrategias de lavado cuando la muestra tiene suciedad *Tierra Lavada*

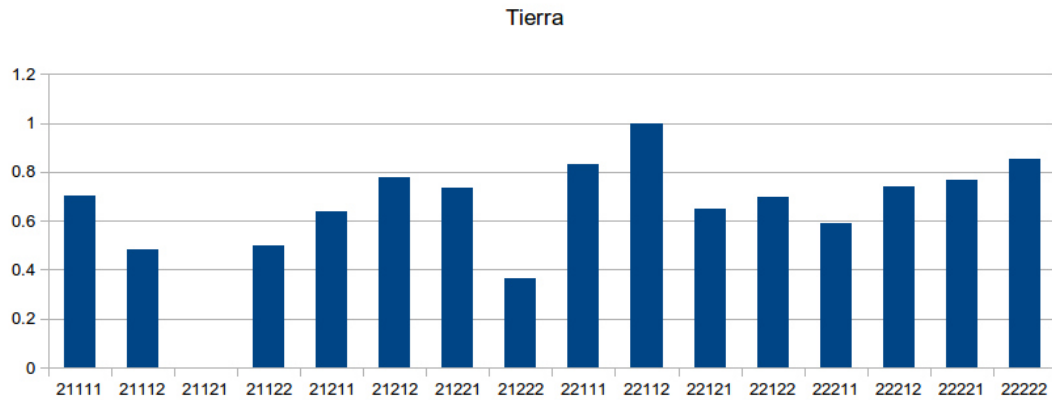


Figura 6.4: Comparativa del Coeficiente de Limpieza Normalizado para distintas estrategias de lavado cuando la muestra tiene suciedad *Tierra*

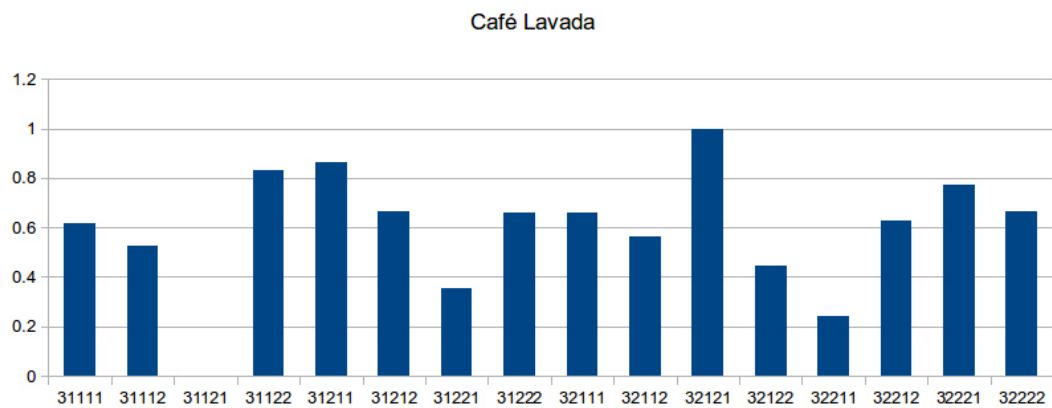


Figura 6.5: Comparativa del Coeficiente de Limpieza Normalizado para distintas estrategias de lavado cuando la muestra tiene suciedad *Café Lavada*

detergente **B** se requiere mayor consumo de energía para mejorar la remoción de *ensuciamientos ligeros*. En el caso de la remoción de ensuciamientos pesados demuestra ser eficiente con el uso de menor energía.

La figura 6.10 muestra de forma comparativa la efectividad de la remoción de manchas con *bajo consumo energético* que se puede esperar empleando el detergente **A** y el detergente **B**. Este gráfico respalda la observación de que para los ensuciamientos ligeros el detergente de **A** es efectivo con consumo mínimo de energía, sin embargo, para los ensuciamientos pesados, el detergente **B** obtiene mejores resultados.

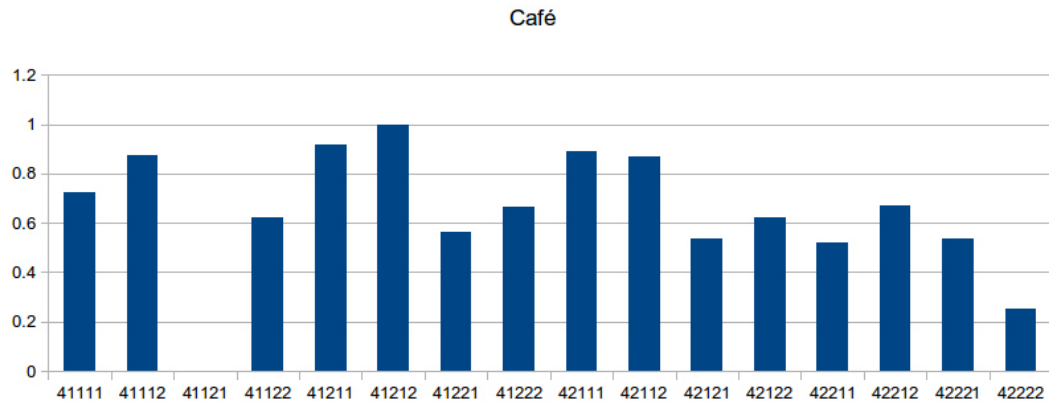


Figura 6.6: Comparativa del Coeficiente de Limpieza Normalizado para distintas estrategias de lavado cuando la muestra tiene suciedad *Café*

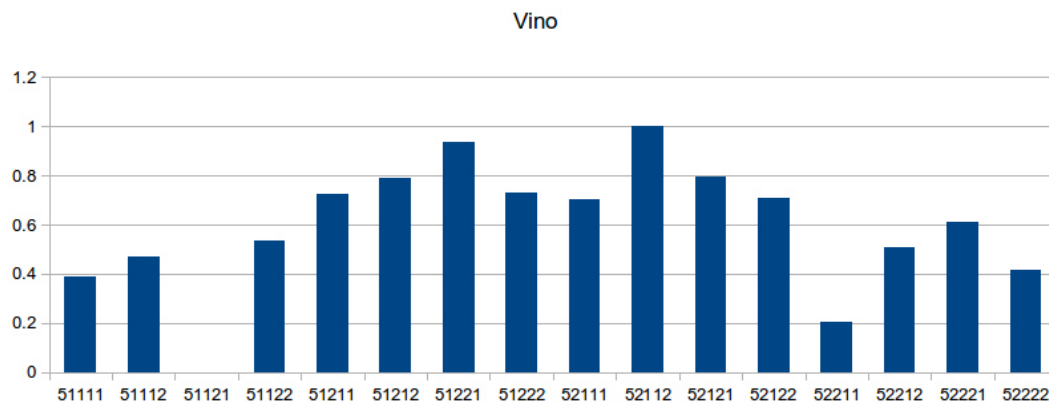


Figura 6.7: Comparativa del Coeficiente de Limpieza Normalizado para distintas estrategias de lavado cuando la muestra tiene suciedad *Vino*

La figura 6.11 muestra de forma comparativa la efectividad de la remoción de manchas con *alto consumo energético* que se puede esperar empleando el detergente **A** y el detergente **B**. Este gráfico muestra que el detergente **B** mejora sustancialmente su desempeño para manchas ligeras superando al detergente **A**, sin embargo, el detergente **A** toma mayor ventaja del uso de la energía en el proceso de remoción de ensuciamiento pesado superando al detergente **B**.

Hasta este momento se ha identificado el uso de la energía sobre la eficacia en la remoción de distintos tipos de ensuciamiento, adicionalmente vale la pena separar el consumo

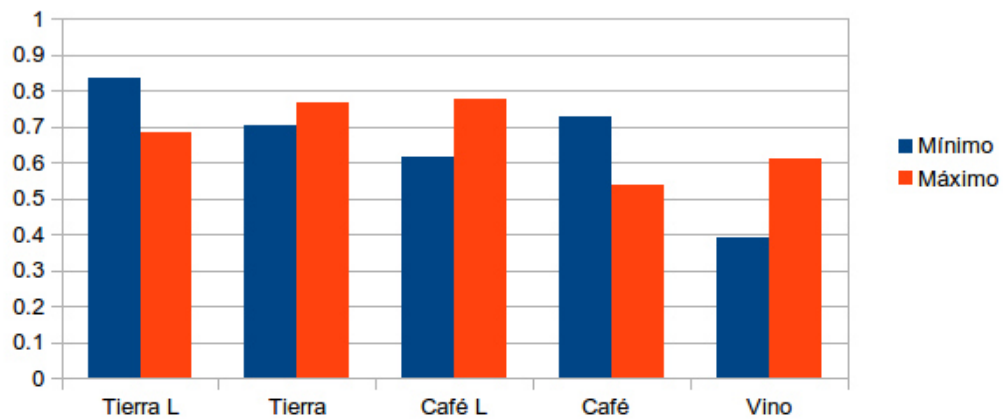


Figura 6.8: Coeficiente de limpieza con el uso de detergente *A* para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con consumo mínimo y consumo máximo de energía

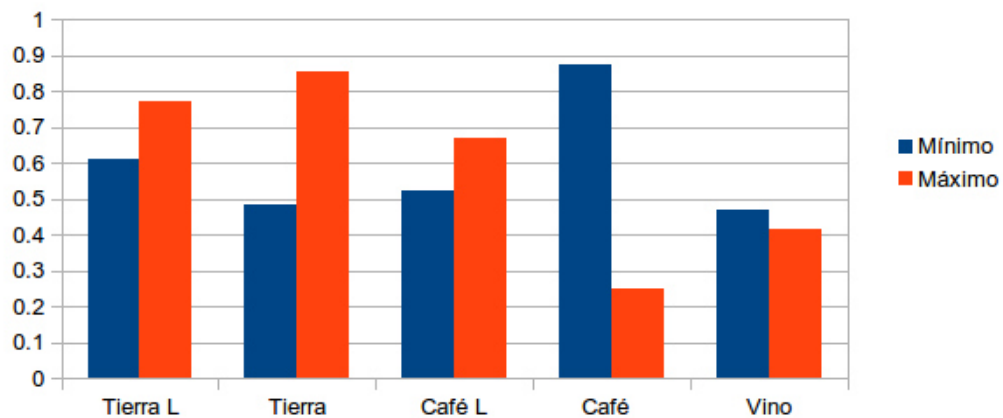


Figura 6.9: Coeficiente de limpieza con el uso del detergente *B* competencia para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con consumo mínimo y consumo máximo de energía

de energía por efectos mecánicos (agitación) y consumo de energía térmica. Por lo anterior analizamos el efecto que tiene cada uno de estos aspectos en la remoción de ensuciamiento.

La figura 6.13 muestra que el detergente *B* tiene mejores resultados cuando se incrementa la agitación mecánica que aquellos obtenidos con el detergente *A*. Este efecto podría ser reconsiderado cuando se evalúa el consumo energético, ya que podría ser ven-

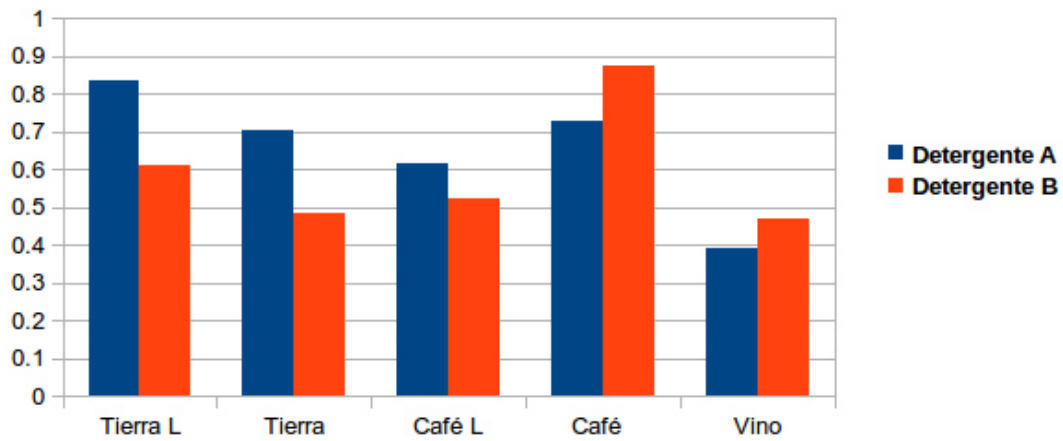


Figura 6.10: Coeficiente de limpieza con consumo mínimo de energía para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con el uso del detergente *A* y el detergente *B*.

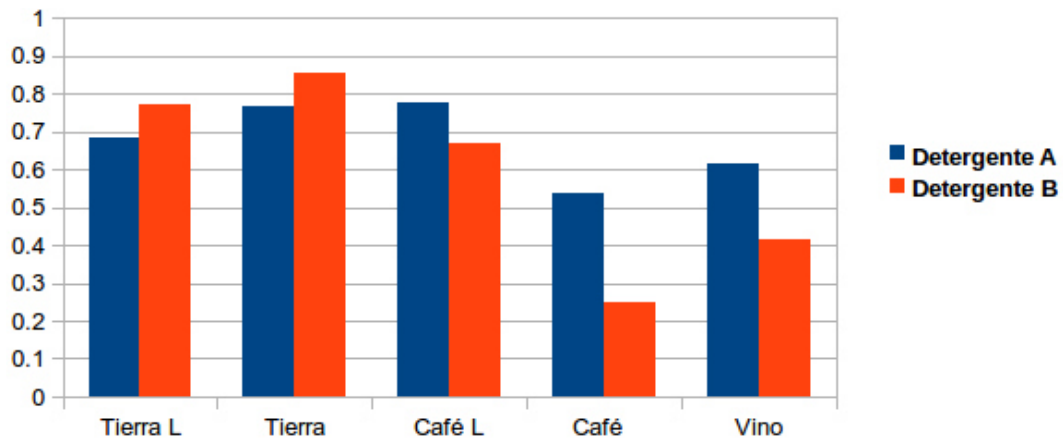


Figura 6.11: Coeficiente de limpieza con consumo máximo de energía para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con el uso del detergente *A* y el detergente *B*.

tajoso el uso del detergente *A* como opción más económica en términos energéticos si los requerimientos de limpieza no son excesivamente exigentes.

Con el objeto de identificar las estrategias más convenientes para el uso del detergente de *A*, se realizó una análisis para evaluar la importancia de la agitación, la duración del ciclo de lavado y la temperatura.

La figura 6.14 muestra que el detergente *A* obtiene mejores resultados en ciclos de lavado de larga duración para ensuciamientos pesados. De la figura es claro que entre más

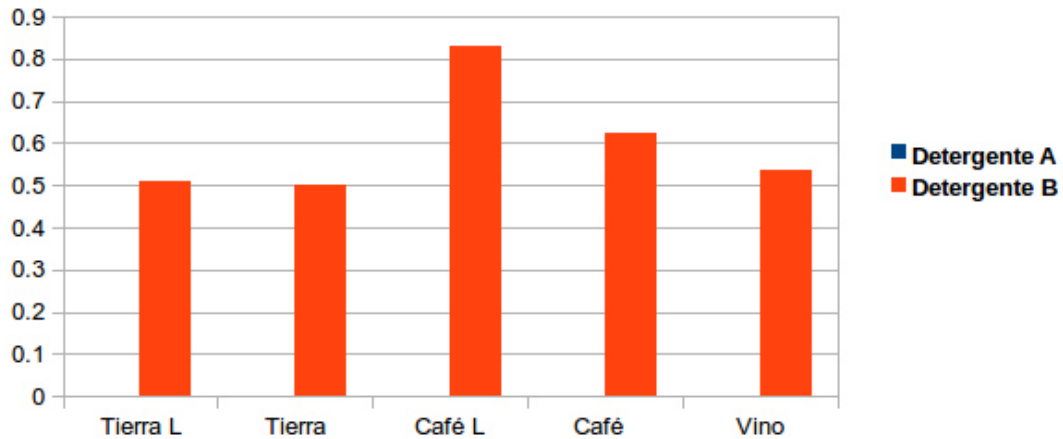


Figura 6.12: Coeficiente de limpieza con consumo mínimo de energía mecánica y máximo de energía térmica, para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con el uso del detergente *A* y el detergente *B*.

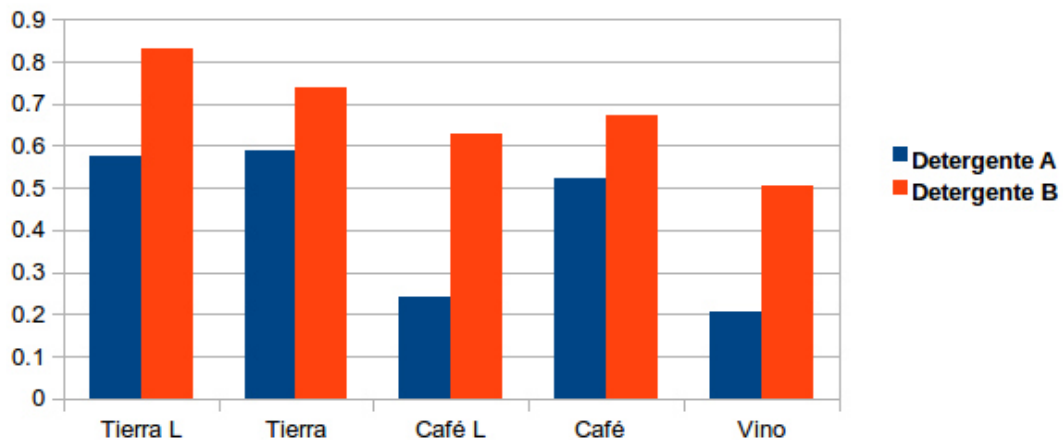


Figura 6.13: Coeficiente de Limpieza con consumo máximo de energía mecánica y mínimo de energía térmica, para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con el uso del detergente *A* y el detergente *B*.

pesado sea el ensuciamiento se requiere mayor duración del ciclo de lavado. En ensuciamientos ligeros no es necesario extender el ciclo de lavado.

La figura 6.15 muestra que se requiere de agitación mecánica suficiente durante el proceso de lavado con el detergente *A* cuando hay bajo consumo energético. Nuevamente es notable que entre más pesado sea el ensuciamiento, existe una diferencia más evidente en la calidad de la limpieza.

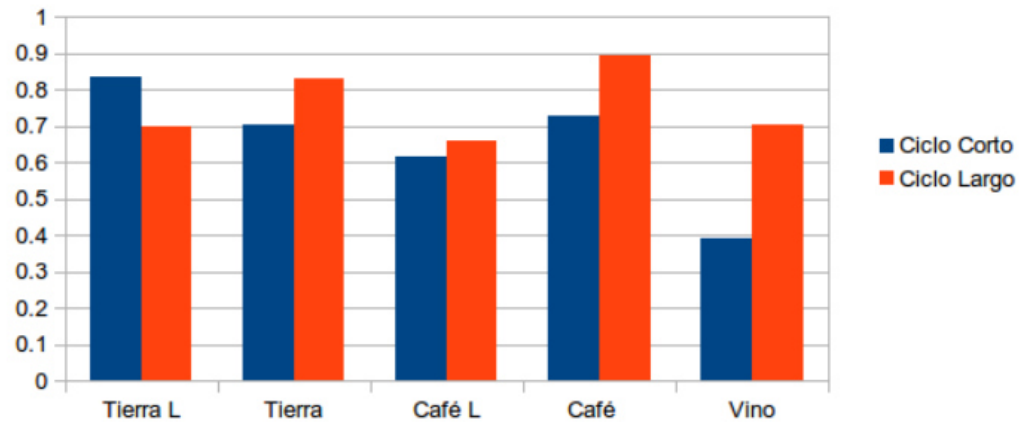


Figura 6.14: Efecto del tiempo del ciclo de lavado sobre el coeficiente de limpieza con el uso del detergente A, con baja agitación y baja temperatura. Comparación entre resultados con ciclo corto y ciclo largo.

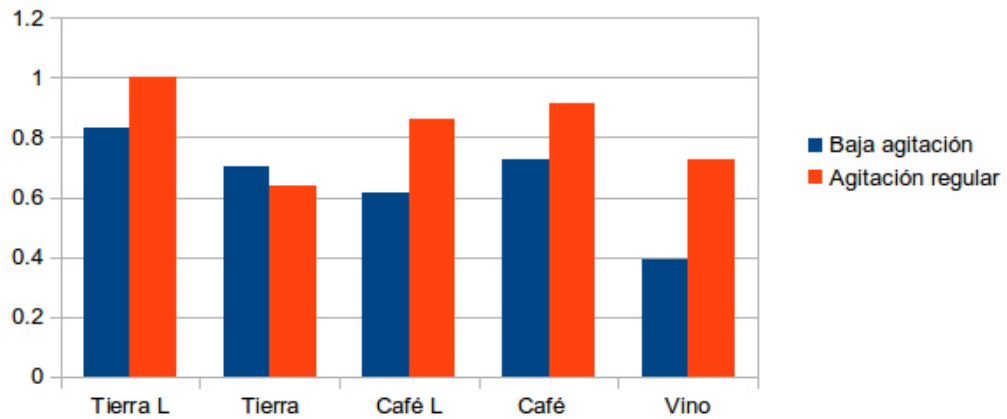


Figura 6.15: Efecto de la agitación del lavado sobre el coeficiente de limpieza con el uso del detergente A, con ciclo corto y baja temperatura. Comparación entre resultados con agitación baja y agitación regular.

La figura 6.16 confirma que los resultados de la calidad de la limpieza obtenida con el detergente A es siempre superior en el caso de los ciclos largos.

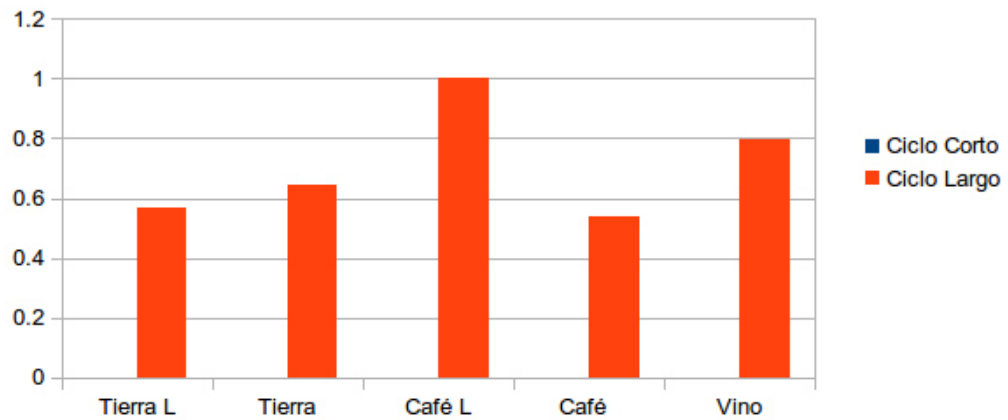


Figura 6.16: Efecto del tiempo del ciclo de lavado sobre el coeficiente de limpieza con el uso del detergente A, con baja agitación y alta temperatura. Comparación entre resultados con ciclo corto y ciclo largo.

Capítulo 7

Conclusiones

7.1. Conclusiones técnicas del estudio de remoción de suciedad.

Para el diseño de experimentos se definieron tres agentes para el ensuciamiento, tierra, café y vino tinto. Se definieron dos niveles de ensuciamiento con base a la concentración de agentes seleccionados (bajo y alto) de tal forma que resultan niveles típicos a los que se somete una prenda de ropa real. Los tipos de ensuciamiento analizados son: i) Ensuciamiento ligero con tierra identificado como *Tierra Lavado*, ii) Ensuciamiento con tierra, *Tierra*, iii) Ensuciamiento ligero con café, *Café Lavado*, iv) Ensuciamiento con café, *Café*, v) Ensuciamiento con vino, *Vino*.

Se trabajó en la definición de los ciclos de lavado, donde se incluye la variación del tiempo del ciclo (8 o 10 minutos), el efecto de la temperatura del agua de lavado (25 °C o 50 °C), y la variación de los niveles de agitación (regular y baja). El diseño de experimentos incluye 40 condiciones distintas. Adicionalmente, es importante mencionar que se corrieron las pruebas un par de veces para comparar de forma objetiva el detergente **A** versus el detergente **B** por lo que se estudiaron 80 muestras en total.

Para llevar a cabo el cálculo de la energía consumida durante el proceso se hace uso de los datos técnicos de una LAVADORA CENTRIFUGADORA. Adicionalmente, se tuvo en consideración el ciclo de lavado especificado para el detergente **A**, cuyo proceso fue propuesto por el centro tecnologico que los desarrollo.

Para la realización de este estudio la suciedad de las muestras se determinó cuantitativamente mediante análisis de imagen. La falta de iluminación en la imagen se percibe como un desplazamiento hacia la izquierda del histograma de la tonalidad de grises, denotando reducción en la intensidad de la luz que pasa a través de la muestra.

Para poder llevar a cabo una comparación cuantitativa de la efectividad de los procesos de lavado de tal forma que sea factible una comparación directa, se definió un parámetro susceptible de ser cuantificado de forma consistente y precisa. Se propuso el *Coefficiente de Limpieza*. Los valores estimados para el Coeficiente de Limpieza de las muestras sin lavar tuvieron una variación que es del orden del 3 %, indicando con ello la forma en la que se ha definido dicho coeficiente es consistente y confiable. En algunas muestras ya lavadas se encontró que el factor de limpieza es mayor a 1.0, indicando con ello que esa muestra en particular ha superado en limpieza a la muestra de referencia (sin lavar y sin mancha), lo que indicaría que la muestra de referencia podría contener cierta suciedad producto de almacenamiento, manipulación, etc., misma que es removida en el proceso de lavado.

El análisis detallado de los resultados de las pruebas físicas permiten establecer las siguientes conjeturas:

1. El coeficiente de limpieza para muestras manchadas con tierra tiene poca variabilidad denotando con ello que la efectividad de la remoción de este tipo de mancha es poco dependiente de las condiciones del proceso de lavado, situación que no ocurre para las manchas de vino en las que evidentemente la efectividad de la remoción es altamente dependiente de las condiciones de lavado.
2. El tipo de mancha identificado como Tierra Lavada (Tierra L) se remueve de manera efectiva consiguiendo, en todos los casos analizados, limpiezas superiores a las muestras de referencia. No obstante lo anterior, es importante notar que en este caso los resultados muestran una alta dependencia en las condiciones de lavado.
3. La efectividad en la remoción de manchas de *Café* es altamente dependiente de las características del proceso de lavado.
4. Es presumible que si la muestra de referencia fuera lavada previo al análisis, no existiría la posibilidad de alcanzar valores iguales o superiores a 1 en el coeficiente de limpieza. Sin embargo, si se lavara la muestra de referencia algunos restos del detergente empleado quedarían implantados en el tejido y esta situación definiría en parte las condiciones en las que se fijarían y se removerían las nuevas manchas, es decir, se afectarían las muestras por lo que el análisis y las conclusiones resultantes podrían ser afectados sistemáticamente por este hecho.

5. Existe una dependencia pequeña de la efectividad de la remoción de las manchas de *Café Lavado* con la estrategia de lavado

Para realizar una comparación directa en términos de la efectividad de la estrategia de lavado fue necesario redefinir el coeficiente de limpieza. Para cada tipo de mancha los coeficientes de limpieza fueron referidos a los valores máximo y mínimo de dicho coeficiente para el tipo de mancha en particular. De este modo se definió el *Coeficiente de limpieza normalizado* que ha quedado escalado obteniéndose así valores entre 0 y 1, donde cero indica la mínima limpieza obtenida y uno la mejor.

6. La comparativa del coeficiente de limpieza normalizado que se obtiene después del lavado de las muestras permite ver que no existe una estrategia única que garantice un mayor coeficiente de limpieza normalizado.
7. Pudo verse que no necesariamente utilizar mucha energía conduce a mejores resultados en la limpieza. Esto es particularmente cierto en la remoción de tierra lavada y en café, condiciones en la que se requiere menor uso energía.
8. Para el detergente **B** se requiere mayor consumo de energía para mejorar la remoción de *ensuciamientos ligeros*. En el caso de la remoción de ensuciamientos pesados demuestra ser más eficiente con el uso de menor energía.
9. Para la remoción de manchas con *alto consumo energético*, el detergente **B** mejora sustancialmente su desempeño par manchas ligeras superando al detergente **A**, sin embargo, el detergente de **A** toma mayor ventaja del uso de la energía en el proceso de remoción de ensuciamiento pesado superando al detergente **B**.
10. Al incrementar la temperatura durante el proceso de lavado el detergente **B** tiene mejor desempeño en la remoción de suciedad cuando se usa un mínimo de agitación mecánica. Esto implica que el detergente **B** requiere un mayor consumo de energía, que se empleará para el calentamiento durante el proceso, para obtener buenos resultados. Éste efecto es más notorio cuando se busca remover el ensuciamiento pesado.
11. El detergente **B** tiene mejores resultados cuando se incrementa la agitación mecánica respecto a los obtenidos con el detergente **A**. Este efecto podría ser reconsiderado

cuando se evalúa el consumo energético, ya que podría ser ventajoso el uso del detergente *A* como opción más económica en términos energéticos si los requerimientos de limpieza no son excesivamente exigentes.

12. El detergente *A* obtiene mejores resultados en ciclos de lavado de larga duración. Entre más pesado sea el ensuciamiento se requiere mayor duración del ciclo de lavado. En ensuciamientos ligeros no es necesario extender el ciclo de lavado.
13. Se requiere de agitación mecánica suficiente durante el proceso de lavado con el detergente *A* cuando hay bajo consumo energético. Nuevamente es notable que entre más pesado sea el ensuciamiento, existe una diferencia más evidente en la calidad de la limpieza.

Anexo

Componentes del Sistema de Lavado

En este Anexo se presentan las características técnicas de cada uno de los componentes que se emplearon en la construcción del dispositivo de lavado.

ESPECIFICACIONES DEL ACTUADOR DE VÁLVULA ML7984 PARA VÁLVULA REGULADORA DE FLUJO

Temperatura de funcionamiento:	0° C a 55 ° C
Temperatura de envío:	-40 ° C a +65 ° C
Humedad relativa:	15 % a 95 % a 40 ° C (104 ° F)
Ruido acústico:	55 dBA máximo
Suministro de energía / Consumo:	24V (nominal), 50/60Hz ó 24 a 28 Vdc. 6VA (Running), 12VA (asientos de válvulas)
Impedancia de entrada:	237 Ohmios

ESPECIFICACIONES DE LA ELECTROBOMBA CENTRIFUGA CPM 620 PEDROLLO

Caudal	10/100 l/min
H	34/19 m
H max	35 m
H min	19 m
Temp. max	90 °C
Kw:	0.75
HP:	1
Hz:	60
V:	127 Volts



Figura 8.1: Actuador de válvula ML7984 para válvula reguladora de flujo

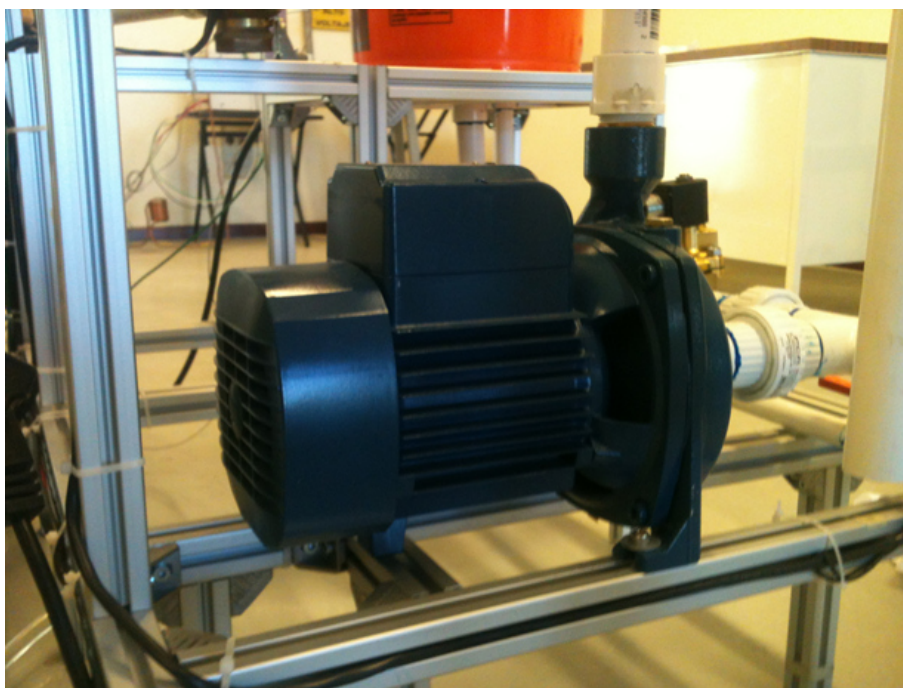


Figura 8.2: Electrobomba centrífuga CPM 620 Pedrollo

ESPECIFICACIONES DEL NI cFP-2200 CONTROLADOR EN TIEMPO REAL CON 128 MB DRAM,
128 MB DE ALMACENAMIENTO

Tipo de Producto:	Controller (Computing Device)
Formato Físico:	Compact FieldPoint
Sistema Operativo/Objetivo:	Real-Time
Frecuencia del Reloj del CPU:	400 MHz
Memoria del Sistema:	128 MB
Ethernet (of ports):	1
Puertos Seriales (RS232):	1
Rango Aleatorio de Frecuencia de Operación:	10 Hz , 500 Hz
Vibración Aleatoria:	5 g
Rango Sinusoidal de Frecuencia de Operación:	10 Hz , 500 Hz
Vibración Sinusoidal:	5 g
Temperatura de Operación:	-40 °C a 70 °C



Figura 8.3: NI cFP-2200 Controlador en Tiempo Real con 128 MB DRAM, 128 MB de Almacenamiento

ESPECIFICACIONES DE LA FUENTE TRIPLE OUTPUT DC POWER SUPPLIES MODELO 1761

Tensión de salida:	0 a 30V
Corriente de salida:	0 a 5A
Tiempo de recuperación:	100 μ s
Display:	Dos LED de 4 dígitos
Voltímetro Resolución:	10 mV
Amperímetro Resolución:	1 mA
Alimentación:	108-132 VAC 60 Hz; 120/220/230/240 / VAC, \pm 10 % , 50/60 Hz versión disponible
Consumo de energía:	350 W

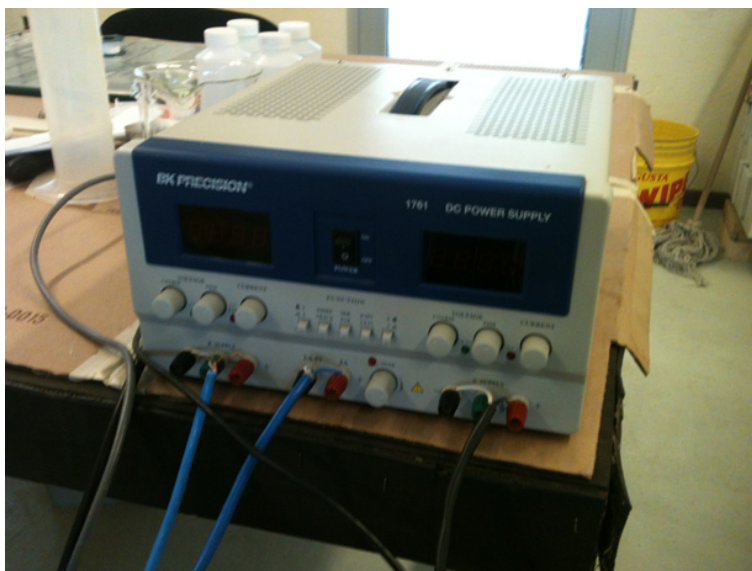


Figura 8.4: Fuente Triple Output DC Power Supplies Modelo 1761

ESPECIFICACIONES DEL CAUDALÍMETRO MAGNETO-INDUCTIVO SM8000

Conexión:	Por conector
Conexión de proceso:	G1 con junta plana
Conexión a la tubería:	Mediante adaptador
Función programable	
Función totalizador	
Salidas:	2
OUT1:	Control de caudal (binario), contador volumétrico de caudal (impulsos), contador de preselección (binario)
OUT2:	Control de caudal o de temperatura (analógico o binario)
Escala de la medida:	0,2...100 l/min
Aplicación:	Fluidos líquidos conductores (Conductividad: mayor o igual que $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ / Viscosidad: $\leq 70 \text{ mm}^2/\text{s}$ a 40°C)
Temperatura del fluido [$^\circ\text{C}$]:	-10...70
Alimentación:	DC PNP/NPN
Tensión de alimentación [V]:	19...30 DC
Consumo [mA]:	120
Resistencia de aislamiento [M Ω]:	> 100 (500 V DC)
Clase de protección:	III
Salida analógica:	4...20 mA; 0...10 V
Carga máx. [Ω]:	500
Carga mínima [Ω]:	2000

ESPECIFICACIONES DEL NI 9472 MÓDULOS DE SALIDA DIGITAL TIPO SOURCING DE 8 CANALES,
LÓGICA DE 24 V Y $100 \mu\text{s}$



Figura 8.5: Caudalímetro magneto-inductivo SM8000

Tipo de Aislamiento:	Aislamiento de Canal a Tierra
Canales de Salida Únicamente:	8
Máximo Rango de Tiempo:	10 kHz
Salida de Flujo de Corriente:	Sourcing
Capacidad de Corriente Simple:	0.75 A
Capacidad de Corriente Total:	6 A
Máximo Rango de Salida:	6 V , 30 V

ESPECIFICACIONES DEL NI cDAQ-9174 CHASIS NI COMPACTDAQ USB DE 4 RANURAS



Figura 8.6: NI 9472 Módulos de Salida Digital Tipo Sourcing de 8 Canales, Lógica de 24 V y 100 μ s

Formato Físico:	USB , CompactDAQ
Sistema Operativo/Objetivo:	Real-Time , Windows
Humedad Relativa de Operación:	10 percent , 90 percent
Requerimientos de Potencia:	15 W
Número de Ranuras:	4
Potencia Total Disponible:	15 W
Rango de Entrada de Voltaje:	9 V , 30 V
Resolución:	32 bits
Interfaz de Bus:	USB 2.0 de Alta Velocidad
Rango Aleatorio de Frecuencia de Operación:	5 Hz , 500 Hz
Vibración Aleatoria:	0.3 g

ESPECIFICACIONES DE LA TARJETA SCR 19Z-12-040

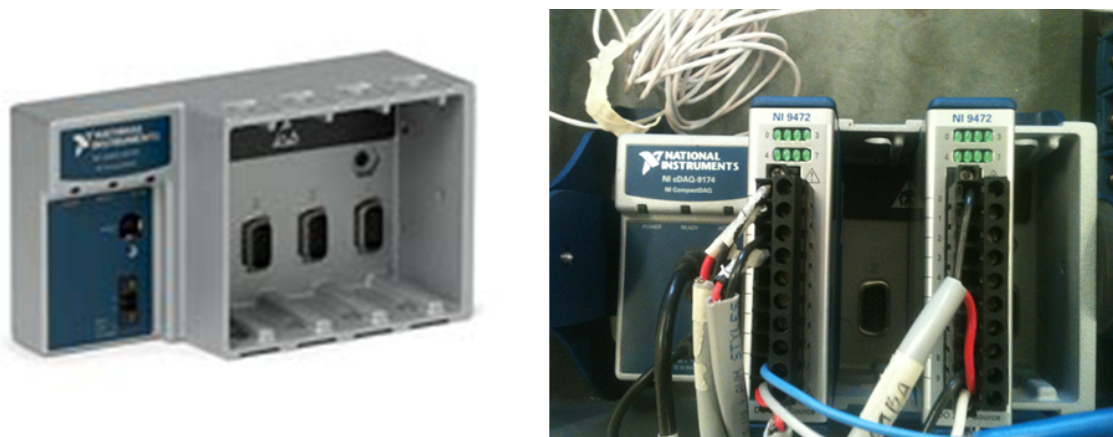


Figura 8.7: NI cDAQ-9174 Chasis USB de 4 Ranuras

Tensión de alimentación:	24 a 600 Vac
Frecuencia:	50 a 60 Hz
Clasificación actual:	40, 60 y 80 A
El aislamiento de la señal de control:	2500 Vac
Protección de Tensión:	MOV y supresión RC
Rango de temperatura ambiente:	0 a 50 ° C
Carga:	resistiva
SCR19P:	1-fase, el control de 1 línea

ESPECIFICACIONES DE LA VÁLVULA REGULADORA DE FLUJO HONEYWELL V5011N 1065



Figura 8.8: tarjeta SCR 19Z-12-040

Dimensión:	6 5/8 pulgadas de alto x 4 1/16 pulgadas de ancho x 1 9/16 profundidad
Máxima presión de operación:	217 psi a 248 °F
Compatible con:	984/ML7984 ; Q5020/DCA ; Q5001/Modutrol IV Motor ; MP953 ; ML6420, 21A, 25 ; ML7420/ML7421A/ML7425
Rango de temperatura ambiente:	36 °F a 248°F (agua)
Tipo de conexión:	Hembra NPT
Patrón del cuerpo:	Dos vías
Tamaño de tubería:	1 pulgada
Tamaño de tubería:	DN25
Tamaño de capo:	1-3/8 pulgadas
Máximo grado de presión diferencial:	240 psi ; para servicios de agua tranquila - 20 psid
Capacidad:	11.7 CV
Capacidad:	(Kv) 10 kvs
Tipo de válvula:	Globo
Presión nominal separadamente estático (psi):	Cumple con ANSI 150 Estándar ANSI / ASME 150



Figura 8.9: Válvula Reguladora de flujo Honeywell V5011N 1065

ESPECIFICACIONES DE LA ELECTROVÁLVULA DE 2 VÍAS PARKER 7221GBN64N00N0C111P3 CON
ELEVADOR DE EFECTO DIRECTO

Operación:	Normalmente cerrada
Tamaño del tubo:	Puerto de 1 pulgada
Conexión:	NPT
Máximo diferencial de presión de operación:	230 PSI
Min Diferencial de presión de operación:	0 PSI
Voltaje / Frecuencia:	120/60 110/50
Material del cuerpo:	material del cuerpo
Juntas:	NBR
Coefficiente de flujo:	Clasificación 11.7
Diámetro del orificio:	1 pulgada
Caja:	Conducto de 1/2 pulgada
Bornes de bobina:	18 pulgadas de cable
Consumo de energía: 10 Watts	
Bobina de aislamiento:	Clase F
Temperatura ambiente:	150 °F
Temperatura de fluido:	185° F
MOPD Aceite:	230 PSI e
MOPD Agua:	230 PSI
MOPD Vapor:	No aplicable
MOPD Aire / Gas:	230

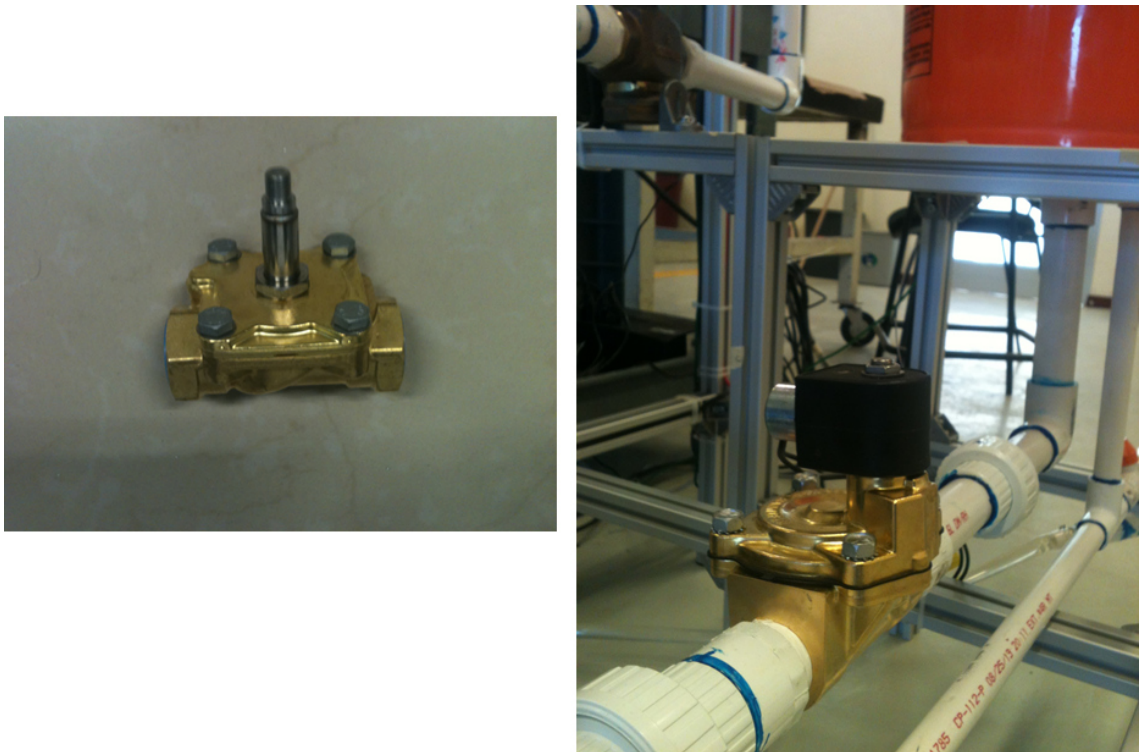


Figura 8.10: Electroválvula de 2 vías Parker

Bibliografía

- [1] **John A. Castricone**, *Clothes washing machine*, **United States Patent 2,416,611**, Feb 25, 1947.
- [2] **James B. Kirby**, *Apparatus for washing clothes*, **United States Patent 2,432,766**, Dec 16, 1947.
- [3] **James B. Kirby**, *Apparatus for washing clothes*, **United States Patent 2,520,366**, Aug 29, 1950.
- [4] **H. Karl Krummel, Terrell W. Gault**, *Detergent compositions*, **United States Patent 3,985,669**, Oct 12, 1976.
- [5] **Clark I. Platt**, *Method of washing clothes*, **United States Patent 3,987,508**, Oct 26, 1976.
- [6] **Pierre C. E. Goffinet**, *Liquid detergent compositions*, **United States Patent 4,414,128**, Nov 8, 1983.
- [7] **Ernst H. Hoffmann, Hans F. Arendt**, *Procedure for washing clothes*, **United States Patent 4,432,111**, Feb 21, 1984.
- [8] **Sooichi Fukuzawa, Tamotu Shikamori**, *Washing machine and method of washing clothes*, **United States Patent 4,791,691**, Dec 20, 1988.
- [9] **Louis Mazzola**, *Detergent composition that dissolves completely in cold water, and method for producing the same*, **United States Patent 5,332,519**, Jul 26, 1994.
- [10] **Louis Mazzola**, *Powder detergent composition for cold water washing of fabrics*, **United States Patent 5,443,751**, Aug 22, 1995.

-
- [11] **Hiroyuki Takagawa**, *Method of washing and drying clothes*, **United States Patent 5,498,266**, Mar 12, 1996.
- [12] **Haeng D. Joo, Bok N. Song**, *Washing method for washing clothes made of wool or silk*, **United States Patent 5,504,954**, Apr 9, 1996.
- [13] **Shu Yamaguchi et al.**, *Washing method and clothes detergent composition*, **United States Patent 5,961,662**, Oct 5, 1999.
- [14] **Louis R. Mazzola**, *Laundry detergent product with improved cold water residue properties*, **United States Patent 6,274,545 B1**, Aug 14, 2001.
- [15] **Gerald Thomas Hinton**, *Detergent*, **United States Patent 6,465,413 B1**, Oct 15, 2002.
- [16] **Lloyd M. DeBoer and Thurstion E. Larson**, *Water Hardness and Domestic Use of Detergents*, JOURNAL AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION Vol. 53, No. 7, July, 1961.
- [17] **Bubl J.L.**, *Laundering Cotton Fabric: Part I: Effects of Detergent Type and Water Temperature on Soil Removal*, Textile Research Journal July 1970 40: 637-643.
- [18] **Purchase M.E. et al.**, *The cost of washing clothes: Sources of variations*, Journal of Consumer Studies and Home Economics, 6: 301-317. 1982.
- [19] **Easley et al.**, *Detergents and Water Temperature as Factors in Methyl Parathion Removal from Denim Fabrics*, Bull. Environm. Contam. Toxicol. 28, 239-244 (1982).
- [20] **F.W.J.L. Maase, R. van TILBURG**, *The Benefit of Detergent Enzymes under Changing Washing Conditions*, JAOCS, vol. 60, no. 9, September 1983.
- [21] **McDonald L.G and Tovey E.**, *The role of water temperature and laundry procedures in reducing house dust mite populations and allergen content of bedding*, Journal of Allergy and Clinical Immunology, Volume 90, Issue 4, Part 1, October 1992, Pages 599-608.
- [22] **Berardesca E. et al.**, *Effects of water temperature on surfactant-induced skin irritation*, Contact Dermatitis, 32: 83-87. 1995.
-

- [23] **Peterson et al.**, *The effect of soap distribution on diarrhoea: Nyamithuthu Refugee Camp*, International Journal of Epidemiology 1998,27-520-524.
- [24] **Zock J.P., et al.**, *Asthma risk, cleaning activities and use of specific cleaning products among Spanish indoor cleaners*, Scand J. Work Environ. Health 2001, 27(1), 76-81.
- [25] **J. J. Scheibel**, *The Evolution of Anionic Surfactant Technology to Meet the Requirements of the Laundry Detergent Industry*, Journal of Surfactants and detergents, Vol. 7, No. 4 (October 2004).
- [26] **Cortez et al.**, *Transglutaminase treatment of wool fabrics leads to resistance to detergent damage*, Journal of Biotechnology 116 (2005) 379-386.
- [27] **C. Mac Namara, A. Gabriele, C. Amador, S. Bakalis**, *Dynamics of textile motion in a front-loading domestic washing machine*, 2012.
- [28] **Mario I. Chacón M.**, *Procesamiento digital de imágenes*, 2008.
- [29] **M.M.C.G. Warmoeskerken, P. van der Vlist, V.S. Moholkar, V.A Nierstrasz**, *Laundry process intensification by ultrasound*, 2002.
- [30] **M.M.C.G. Warmoeskerken**, *Intensification of Textile Treatments*., 2002.
- [31] **R. Byron Bird- Warren E. Stewart- Edwin N. Lightfoot**, *Fenómenos de transporte*, 2004.

Lista de símbolos

B	Balncura
I_{N-E}	Imagen Norte-Este
I_{N-O}	Imagen Norte-Oeste
I_S	Imagen Sucia
I_B	Imagen Blanca
i	Suciedad
$M5$	Muestra número 5
$M15$	Muestra número 15
$M34$	Muestra número 34
$M39$	Muestra número 39
PAC	Programmable automation controller
PC	Personal computer
PI	Proportional integral contro- ller
S_{max}	Suciedad Maxima
USB	Universal serial bus
VAC	Voltage alternating current
VDC	Voltage direct current
μ	Medida de Blancura

Índice de figuras

2.1. Tensiones involucradas en un equilibrio trifásico sobre un plano. Sustrato (<i>S</i>), agua (<i>W</i>), aire (<i>A</i>)	12
2.2. Angulos de contacto en un equilibrio trifásico sobre un plano. Sustrato (<i>S</i>), agua (<i>W</i>), aceite (<i>O</i>).	13
2.3. Encogimiento de una gota de sucio orgánico (<i>O</i>) por aumento de la mojabilidad del sustrato (<i>S</i>) por la fase acuosa (<i>W</i>) mediante adición de surfactante.	14
2.4. Existen varios tipos de solubilización micelar en agua: (a) de sustancia apolar, hidrocarburo, aceite...; (b) comicelizacion de un anfífilo, alcohol, amina ...; (c) de un solido insoluble en ambas fases, talco, arcilla...; (d) de sustancias polares en cadenas poli-óxido de etileno	15
2.5. Estructura textil.	18
2.6. Flujo de líquido alrededor y a través de un hilo textil. Los puntos en la figura representan las fibras del hilo.	19
2.7. El mecanismo de transferencia de masa en los textiles. (A) Esquema que indica la estructura general y porosidad dual de los textiles; (B) Las tres etapas de la transferencia de masa en los materiales textiles y los perfiles de concentración típicos de la sustancia difusora.	22
2.8. Sistema de lavado	25
2.9. Vista frontal del sistema de lavado	26
2.10. Vista lateral izquierda del sistema de lavado	26
2.11. Esquema que ilustra los componentes del sistema de lavado	27
2.12. Mallas para generación de agitación en la zona de pruebas.	28

2.13. Vista frontal del Sistema de lavado	28
2.14. Vista lateral izquierda del Sistema de lavado	29
2.15. Muestras montadas en un bastidor para exponerlo a la corriente de agua en la zona de prueba	31
2.16. Dosificación del detergente para las pruebas físicas	32
2.17. Pantalla que muestra un instrumento virtual que controla automáticamente todos los actuadores del sistema de forma consistente con el programa de lavado	32
3.1. Camara oscura	34
3.2. Colocación de la primera placa de vidrio	36
3.3. Colocación de la hoja de papel albanene para disipar la luz de vidrio	37
3.4. Colocación de la tercera placa de vidrio	37
3.5. Conjunto de muestras de textil colocada en las placas para pruebas de blancura	38
3.6. Imagen que muestra la tapa de la cámara oscura donde se refleja la luz	38
3.7. Uso de una regla para asegurar el enfoque de la cámara de video	39
3.8. Pantalla que muestra la imagen de una muestra textil una vez que se ha enfocado la cámara de video	40
3.9. Imagen que muestra la distribución por cuadrantes de las imágenes digitales	41
3.10. Fotografía en la que se puede apreciar la colocación de cuatro muestras textiles en los cuadrantes de las imágenes digitales	41
3.11. Pantalla que muestra las imágenes digitales de una muestra de color blanco y limpia	42
3.12. Pantalla que muestra los perfiles de coloración a lo largo de los cuadrantes de las imágenes digitales de una muestra de color blanco y limpia	42
4.1. Imágenes de una muestra sin suciedad. <i>Izquierda</i> imagen original. <i>Dere- cha</i> imagen promedio.	48
4.2. Imágenes extraídas a partir de la adquisición de imágenes. <i>Izquierda</i> : Mues- tra limpia. <i>Derecha</i> : Muestra con mancha de vino.	49
4.3. En la imagen la línea roja representa el histograma para la muestra de vino y la línea azul representa el histograma para la muestra limpia.	50

4.4.	Histograma para muestras con manchas de vino M5 (azul) y M15 (rojo). La línea de color verde muestra el histograma de la muestra con mancha de vino sin lavar	51
4.5.	Histograma para muestras con manchas de café M34 (azul) y M39 (rojo). La línea de color verde muestra el histograma de la muestra con mancha de café sin lavar	51
4.6.	Histogramas comparativos que ilustran cualitativamente la efectividad del lavado.	53
4.7.	Coeficiente de limpieza para muestras manchadas con vino una vez que han sido lavadas y las muestras sin lavar con el mismo tipo de mancha . .	54
4.8.	Coeficiente de limpieza para muestras manchadas con tierra una vez que han sido lavadas y las muestras sin lavar con el mismo tipo de mancha . .	55
4.9.	Coeficiente de limpieza para muestras manchadas con tierra lavada una vez que han sido lavadas y las muestras sin lavar con el mismo tipo de mancha	55
4.10.	Coeficiente de limpieza para muestras manchadas con café una vez que han sido lavadas y las muestras sin lavar con el mismo tipo de mancha . .	56
4.11.	Coeficiente de limpieza para muestras manchadas con café lavado una vez que han sido lavadas y las muestras sin lavar con el mismo tipo de mancha	57
4.12.	Coeficiente de limpieza normalizado para la totalidad de muestras anali- zadas en este estudio	57
5.1.	Diseño de experimentos diseñado para los procesos de lavado	59
5.2.	Diseño de experimentos diseñado para los procesos de lavado. <i>Continuación</i>	60
5.3.	Codificación para identificación de muestras	61
5.4.	Proceso propuesto para el detergente A	62
6.1.	Coeficiente de Limpieza Normalizado en función de las características del lavado.	65
6.2.	Coeficiente de Limpieza Normalizado en función de las características del lavado. <i>Continuación</i>	66
6.3.	Comparativa del Coeficiente de Limpieza Normalizado para distintas es- trategias de lavado cuando la muestra tiene suciedad <i>Tierra Lavada</i>	66

6.4. Comparativa del Coeficiente de Limpieza Normalizado para distintas estrategias de lavado cuando la muestra tiene suciedad <i>Tierra</i>	67
6.5. Comparativa del Coeficiente de Limpieza Normalizado para distintas estrategias de lavado cuando la muestra tiene suciedad <i>Café Lavada</i>	67
6.6. Comparativa del Coeficiente de Limpieza Normalizado para distintas estrategias de lavado cuando la muestra tiene suciedad <i>Café</i>	68
6.7. Comparativa del Coeficiente de Limpieza Normalizado para distintas estrategias de lavado cuando la muestra tiene suciedad <i>Vino</i>	68
6.8. Coeficiente de limpieza con el uso de detergente A para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con consumo mínimo y consumo máximo de energía	69
6.9. Coeficiente de limpieza con el uso del detergente B competencia para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con consumo mínimo y consumo máximo de energía	69
6.10. Coeficiente de limpieza con consumo mínimo de energía para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con el uso del detergente A y el detergente B	70
6.11. Coeficiente de limpieza con consumo máximo de energía para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con el uso del detergente A y el detergente B	70
6.12. Coeficiente de limpieza con consumo mínimo de energía mecánica y máximo de energía térmica, para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con el uso del detergente A y el detergente B	71
6.13. Coeficiente de Limpieza con consumo máximo de energía mecánica y mínimo de energía térmica, para los cinco agentes de ensuciamiento analizados. Comparación entre resultados con el uso del detergente A y el detergente B	71
6.14. Efecto del tiempo del ciclo de lavado sobre el coeficiente de limpieza con el uso del detergente A , con baja agitación y baja temperatura. Comparación entre resultados con ciclo corto y ciclo largo.	72

6.15. Efecto de la agitación del lavado sobre el coeficiente de limpieza con el uso del detergente <i>A</i> , con ciclo corto y baja temperatura. Comparación entre resultados con agitación baja y agitación regular.	72
6.16. Efecto del tiempo del ciclo de lavado sobre el coeficiente de limpieza con el uso del detergente <i>A</i> , con baja agitación y alta temperatura. Comparación entre resultados con ciclo corto y ciclo largo.	73
8.1. Actuador de válvula ML7984 para válvula reguladora de flujo	79
8.2. Electrobomba centrífuga CPM 620 Pedrollo	79
8.3. NI cFP-2200 Controlador en Tiempo Real con 128 MB DRAM, 128 MB de Almacenamiento	80
8.4. Fuente Triple Output DC Power Supplies Modelo 1761	81
8.5. Caudalímetro magneto-inductivo SM8000	83
8.6. NI 9472 Módulos de Salida Digital Tipo Sourcing de 8 Canales, Lógica de 24 V y 100 μs	84
8.7. NI cDAQ-9174 Chasis USB de 4 Ranuras	85
8.8. tarjeta SCR 19Z-12-040	86
8.9. Válvula Reguladora de flujo Honeywell V5011N 1065	87
8.10. Electroválvula de 2 vías Parker	88

Índice de tablas

3.1. Especificaciones de la cámara fotográfica utilizada para la adquisición de imágenes	35
--	----